

**Florestas e água: Uma revisão crítica da componente  
“água verde” no conceito *Water Footprint Network*  
(WFN) para o papel.**

**Marta Maria Castelo Santos de Almeida Domingues do Souto  
Barreiros**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais**

Orientadores: Professor Catedrático Jorge Manuel Martins Soares David  
Doutora Clara Maria de Assunção Pinto

**Júri**

Presidente: Doutora Maria Margarida Branco de Brito Tavares Tomé, Professora  
Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutor Jorge Manuel Martins Soares David, Professor Catedrático do Instituto  
Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Doutora Maria Teresa Gomes Afonso do Paço, Professora Auxiliar do Instituto  
Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

***'Water is the driving force of all nature'***

**Leonardo Da Vinci (1452-1519).**

**À minha mãe.**

**À minha família.**



## **Agradecimentos**

O meu primeiro pensamento e agradecimento vai para o Eng. João Soares, muito obrigada pelo desafio, custou bastante, mas também proporcionou momentos excepcionais e permitiu aprofundar conhecimentos num tema tão importante, como é o tema da Água.

O meu agradecimento especial ao Professor Jorge Soares David pela paciência em trabalhar comigo e pela sua orientação ao longo de todo este tempo. À Dra. Clara Pinto, uma amiga acima de tudo, o meu profundo agradecimento por toda a sua ajuda e colaboração nos momentos mais difíceis, só com o seu apoio e orientação foi possível levar a tese a bom porto. Muito obrigada por tudo Clara!

Quero agradecer também à CELPA, em especial ao Eng. Armando Goes (anterior Director-Geral da CELPA), por me ter proporcionado a realização desta tese e todo o seu apoio. Ao Eng. Carlos Vieira, actual Director-Geral da CELPA pela possibilidade, nesta fase final de me dedicar a “tempo inteiro” esperando que, no final, este trabalho seja útil para a indústria papelreira portuguesa e em particular para as empresas associadas da CELPA.

Agradeço aos meus colegas e amigos, Ana Fernandes, Cláudia Garcia e ao Francisco Goes, que sempre presentes foram dando o seu apoio moral de uma forma subtil, mas sentida. Um agradecimento também à Dra. Paula Soares pela colaboração e disponibilização dos dados e ao Eng.º José Luís Carvalho pelo acompanhamento deste tema.

Quero agradecer ao “Mestre e Engenheiro” Manel Fraga, que me acompanhou no último ano e que me ajudou a acreditar que era possível chegar ao fim deste caminho, e concluir mais uma etapa académica na minha vida. Obrigada Manel, por toda a sua simpatia.

Por último, agradeço ao Luís a sua paciência infinita, as suas palavras de alento e alguns “sermões” para que concluísse a tese e acreditasse que valeu a pena o esforço. Aos meus filhos, Luís, Nônô e Manelinho que acreditem sempre que é possível atingirem os seus objectivos. Muito obrigada meus queridos!



## Resumo

As florestas são uma componente importante do ciclo da água. São grandes utilizadores de água, que armazenam e usam na produção de biomassa, influenciam o seu movimento contínuo, favorecendo a infiltração e contribuindo para a precipitação, através da evapotranspiração.

Nos últimos anos, o impacto das florestas, e mais especificamente das plantações florestais, nos recursos hídricos locais e no ciclo hidrológico global tem sido objecto de discussão aprofundada, a nível nacional e internacional. A crescente preocupação com o impacto das actividades humanas sobre o recurso água, conduziu a uma maior consciencialização da necessidade da sua gestão sustentável. Este tema tem estado no centro de debates entre investigadores, academia, indústria, legisladores, organizações ambientais e a sociedade em geral.

Neste contexto, têm surgido várias metodologias com o intuito de avaliar e quantificar o uso da água na cadeia de produção de diversos produtos, como, por exemplo: *Water Footprint Network (WFN)*, *Norma ISO – ISO 14046*, *EWP – Water Stewardship Program*, *PREPS Watertool*. Estas metodologias tornaram-se poderosos instrumentos de comunicação, cuja influência na aceitabilidade social de diversas actividades é relevante. No entanto, o seu rigor e fundamentação científica é por vezes questionável. Tal é o caso do conceito *Water Footprint Network*, metodologia pioneira, na introdução do conceito e na contabilização da pegada hídrica e que tem actualmente grande impacto na opinião pública. Este trabalho pretende ter uma ação pedagógica de divulgação, fazendo uma revisão actualizada do conhecimento sobre a relações florestas-água e, com base nisso, uma apreciação crítica da aplicação da componente “água verde” da WFN a povoamentos de *Eucalyptus globulus* e à produção de papel em Portugal. Dois exercícios de cálculo para povoamentos de Eucalipto em Portugal, evidenciam algumas das fragilidades da metodologia e que a pegada hídrica de 1 folha de papel A4, inicialmente estimados pelo WFN, de 10 litros é uma clara sobre-estimativa.

**Palavras-Chave:** Pegada hídrica; Papel; *Eucalyptus globulus*; Ciclo hidrológico



## Summary

Forests are an important component of the water cycle. They are large water users, storing and using it for biomass production, influencing the continuous movement of water by promoting infiltration and contributing to precipitation through evapotranspiration.

Recently, the impact of forests, and more particularly of forest plantations, on the local water resources and on the global water cycle has been widely discussed. There is a growing concern on the impact of anthropogenic activities on water availability and the need of its sustainable management. These issues have been subject to frequent discussions between researchers, academia, industry, environmental NGO, and society in general. Within this context, different methodologies have been developed trying to evaluate water use in the production chain of several products. Among these are: the Water Footprint Network (WFN), ISO Standard – ISO 14046, EWP – Water Stewardship Program, and PREPS Watertool. These methods became powerful communication tools, with relevant influence on the social acceptability of certain activities. However, their scientific background and rigour is sometimes questionable. This is the case of the *Water Footprint Network*, a pioneer concept that currently has a strong impact on public opinion. This work aims to have a pedagogic transfer of knowledge, through an updated review on the forests-water relationships and, based on it, critically analyse the application of the “green water” component of WFN to Portuguese *Eucalyptus globulus* stands and the production of a A4 size paper sheet in Portugal. Two examples of calculation for *Eucalyptus* stands in Portugal show the fragilities of the method and that the water footprint of an A4 size paper sheet initially estimated by the WFN (10 L) is a clear overestimation.

**Key-words:** Water footprint; Paper; *Eucalyptus globulus*; Hydrologic cycle





## Índice

1	Introdução	1
1.1	Descrição do problema	2
1.2	Identificação dos objectivos	3
2	Revisão da literatura	4
2.1	Enquadramento Legislativo Nacional e Internacional da Água	4
2.2	Enquadramento Científico	6
2.2.1	O Ciclo Hidrológico Global – Sistema Fechado	7
2.2.2	Bacia Hidrográfica – Sistema Aberto – O Impacto das florestas	9
2.2.2.1	Evapotranspiração	12
2.2.2.1.1	Transpiração	12
2.2.2.1.2	Perdas por intercepção pelo coberto vegetal	15
2.2.3	As florestas e a evapotranspiração - Tendências gerais	17
2.2.4	Escoamento	19
2.2.5	O caso particular das plantações de <i>Eucalyptus globulus</i>	24
2.2.5.1	Resultados de Pares de Bacias - Escoamento total anual	24
2.2.5.2	Resultados de Pares de Bacias – Caudais de ponta de cheia e caudais mínimos	26
2.2.5.3	Evapotranspiração - Balanço de Bacias ( <i>ET</i> )	26
2.2.5.3.1	Transpiração ( <i>T</i> )	28
2.2.5.3.2	Perdas por intercepção ( <i>I</i> )	29
2.2.6	Comentários finais	30
3	Metodologia de investigação	31
3.1	<i>Water Footprint Network</i> – o conceito de Pegada Hídrica	31
3.1.1	Pegada hídrica directa e indirecta	33
3.1.2	Pegada hídrica interna e externa	34
3.1.3	Pegada hídrica azul	34
3.1.4	Pegada hídrica verde	35
3.1.5	Pegada hídrica cinzenta	36
3.1.6	Pegada hídrica de um produto	37
3.1.7	Pegada hídrica associada às actividades florestais	39
4	A utilização da água no processo industrial de pasta, papel e cartão	41
5	Análise crítica do cálculo da componente “água verde” na pegada hídrica do papel	45
5.1	A utilização da água no processo industrial de pasta, papel e cartão	45
5.2	Análise crítica do cálculo da componente “água verde” na pegada hídrica do papel	49
5.2.1	Considerando a alocação da evapotranspiração em função da partição de biomassa	49
5.2.2	Considerando a evapotranspiração e a produção média numa região hidrográfica	50
6	Considerações finais e sugestões	56
7	Referências bibliográficas	58



## Índice de Quadros

Quadro 2.1: Valores acumulados de precipitação bruta para o período entre Janeiro de 1992 e Julho de 1994. ....	30
Quadro 3.1: Teor médio global de água-virtual de produtos seleccionados, por unidade de produto. ....	38
Quadro 5.1: Distribuição da biomassa total, num povoamento de <i>Eucalyptus globulus</i> , pelas suas componentes. ....	49
Quadro 5.2: Dados do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis - RH4.....	52
Quadro 5.3: Variáveis para o cálculo do <i>WF</i> dos produtos papaleiros portugueses....	53



## Índice de Figuras

Figura 2.1: O Ciclo Hidrológico Global. ....	8
Figura 2.2: Representação esquemática de uma bacia hidrográfica, com identificação das entradas e saídas do sistema.....	10
Figura 2.3: Representação esquemática do movimento da água através da planta para sustentar a transpiração .....	13
Figura 2.4. Representação esquemática do modelo da folha gigante .....	14
Figura 2.5: Representação esquemática dos processos que constituem as perdas por interceptação .....	16
Figura 2.6: Esquema exemplificando as trocas gasosas.....	18
Figura 2.7: Método dos pares de bacias .....	19
Figura 2.8: Efeitos do coberto florestal no escoamento anual .....	20
Figura 2.9: Relação entre a evapotranspiração anual e a precipitação anual para diferentes tipos de vegetação .....	21
Figura 2.10: Processos de escoamento.....	22
Figura 2.11: Redução no escoamento total causado pela plantação de <i>Eucalyptus globulus</i> e, após o corte, pelo crescimento da talhadia (segunda rotação) .....	25
Figura 2.12: Relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração anual em quatro bacias com povoamentos adultos de <i>Eucalyptus globulus</i> em Portugal ( $n=30$ )	27
Figura 2.13: Uso da água por <i>E. globulus</i> e <i>Pinus pinaster</i> em Portugal.....	28
Figura 3.1: Pegada hídrica dos diversos países ( $m^3/hab/ano$ ) .....	32
Figura 3.2: Esquema ilustrativo das componentes da pegada hídrica.....	33
Figura 3.3: Pegada hídrica directa e indirecta em cada estágio da cadeia de suprimento de um produto de origem animal .....	34
Figura 4.1: Evolução da utilização da água pela indústria de pasta papel e cartão nos últimos anos .....	42
Figura 4.2: Captação de água total – origem da água.....	43
Figura 4.3: Rejeição de efluentes líquidos – volume total .....	43
Figura 4.4: Rejeição dos efluentes líquidos – destino dos efluentes .....	44
Figura 5.1: Esquema ilustrativo das componentes de biomassa.....	49

Figura 5.2: Bacias hidrográficas dos rios Mondego, Vouga e Lis .....	51
Figura 5.3: Cobertura florestal ( <i>Eucalyptus globulus</i> ) nas três bacias hidrográficas seleccionadas em Portugal. ....	51

## Abreviaturas, símbolos, siglas e acrónimos

$\alpha$  – Fracção de lixiviação de um poluente

APA – Agência Portuguesa de Ambiente

AR – Taxa de aplicação de químicos por hectare

BREF – *Best Available Techniques Reference Document*

CELPA – Associação da Indústria Papeleira

CEPI – *Confederation of European Paper Industries*

$c_{max}$  – Padrão de qualidade de um poluente, concentração máxima admissível na água

$c_{nat}$  – Concentração natural de poluente na massa de água receptora

$D$  – Défice de pressão de vapor do ar

$dpc$  – Duração do período de crescimento em dias

DQA – Directiva Quadro da Água

$ET$  – Evapotranspiração

EWP – *European Water Partnership*

FAO – *Food and Agriculture Organization*

FSC – *Forest Stewardship Council*

$f_{paper}$  – Factor de conversão de madeira para papel

$f_{value}$  – Fração do valor total da floresta associada à produção de papel

$f_{recycling}$  – Fração de pasta proveniente de papel reciclado

$f_{water}$  – Volume de água consumido por unidade de madeira recém cortada

$I$  – Perdas por Intercepção

IAF – Índice de área foliar

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO – *International Organization for Standardization*

$L$  – Carga poluente

MTD – Melhores Técnicas Disponíveis

$P$  – Precipitação

$PA_{proc}$  – Pegada de água total associada ao processo de crescimento das árvores

$PA_{proc,azul}$  – Componente azul da pegada de água de um processo

$PA_{proc,cinzenta}$  – Componente cinzenta da pegada de água de um processo

$PA_{proc,verde}$  – Componente verde da pegada de água de um processo

PEFC – *Programme of Endorsement for Forest Certification Schemes*

PGRH – Planos de Gestão de Região Hidrográfica

PNA – Plano Nacional da Água



PNUEA – Plano Nacional de Uso Eficiente da Água

PREPS – *Publishers database for Responsible Environmental Paper Sourcing*

$Q$  – Escoamento

RH4 – Região Hidrográfica 4

$r_a$  – Resistência aerodinâmica

$r_c$  – Resistência do coberto

$R_n$  – Radiação líquida

$T$  – Transpiração

$UA$  – Uso da água pelas árvores no processo de crescimento

$UA_{verde}$  – Componente verde do uso da água pelas árvores

$UA_{azul}$  – Componente azul do uso da água pelas árvores

UNESCO - IHE – *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-Institute for Water Education*

$WF_{forestry}$  – Pegada hídrica da indústria de pasta, papel e cartão

WFN – *Water Footprint Network*

WWAP – *World Water Assessment Programme*

$Y$  – Produtividade

$Y_{wood}$  – Biomassa utilizada no produto (madeira cortada)



# 1. Introdução

As florestas cobrem cerca de um terço da superfície continental terrestre (Food and Agriculture Organization (FAO), 2016). São parte integrante do ciclo da água (van der Ent *et al.*, 2010; Ellison *et al.*, 2017), influenciam o balanço de carbono e de radiação e, consequentemente, o clima (Bonan, 2008; Oki, 2005). Para além disso, os ecossistemas florestais promovem serviços ambientais como o sequestro de carbono, a protecção do solo, a manutenção da biodiversidade e a produção de alimentos e biomassa.

A produção florestal, tal como quase todas as actividades humanas, depende da utilização de água. A crescente pressão sobre os recursos hídricos, decorrente do aumento contínuo da população humana (World Water Assessment Programme (WWAP), 2016) e da maior irregularidade na distribuição da precipitação (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014), tem acentuado as discrepâncias ao nível das disponibilidades/necessidades e atraído atenção para a sustentabilidade, presente e futura, do uso do recurso água (e.g. Gleick, 1993; Lundqvist, 2000; Vörösmarty *et al.*, 2000, 2010; Rijsberman, 2006; Calder, 2007; Hoekstra e Chapagain, 2008; Cook e Bakker, 2012; Chenoweth *et al.*, 2014; WWAP, 2016).

Estando a madeira na base da produção de pasta e dos produtos papeleiros, compreende-se que os consumos hídricos associados ao sector da pasta, papel e cartão, quer fase na produção florestal, quer na fase industrial, tenham sido alvo de atenção (Thompson *et al.*, 2001; Andréassian, 2004; Calder, 2007; González-García *et al.*, 2009; van Oel e Hoekstra, 2010, 2012; Liu *et al.*, 2012; Camargo, 2013), Schyns *et al.*, 2017; Burman *et al.*, 2018) e escrutínio por parte de organizações internacionais.

Neste contexto, as questões da água têm sido consideradas como um assunto prioritário para a indústria papeleira europeia e nacional (CEPI, 2013; Celbi, 2015; The Navigator Company, 2015), que com este trabalho pretendem desenvolver uma análise crítica da componente “água verde” no conceito *Water Footprint Network* (WFN) em florestas. Este trabalho pretende ter uma ação pedagógica de divulgação, fazendo uma revisão actualizada do conhecimento sobre as relações florestas-água, com base nisso, uma análise crítica da aplicação da componente “água verde” no conceito *Water Footprint Network* (WFN) em florestas.

## 1.1 Descrição do problema

Foi no contexto de crescente atenção internacional sobre as questões da água que surgiram diferentes metodologias e esquemas de avaliação do uso da água e do impacto de determinadas actividades e sectores nos recursos hídricos, nomeadamente: a *Water Footprint Network* (WFN) (Hoekstra e Chapagain, 2007, 2008; Hoekstra *et al.*, 2009, 2011), o desenvolvimento da Norma ISO – ISO 14046 (International Organization for Standardization (ISO), 2014), a *European Water Partnership* (European Water Partnership, 2010), a *Alliance for Water Stewardship* (<http://a4ws.org/>), a *PREPS Water Tool*, entre outros (e.g. Allan, 1998; 2003). Certas metodologias, como por exemplo, *PREPS Watertool* (iniciativa colaborativa da indústria editorial do Reino Unido, conhecida como *Publishers database for Responsible Environmental Paper Sourcing*), pretende promover a responsabilização da cadeia de fornecimento de papel (Water Efficiency Conference, 2013), outras, como por exemplo a *Water Footprint Network* pretendem calcular, estimar e traduzir num indicador quantitativo os impactos directos e indirectos de um produto ou sector sobre o recurso água (Allan, 1998; Hoekstra, 2009; Hoekstra *et al.*, 2011; van Oel e Hoekstra, 2012). Noutros casos, como na AWS – *Alliance for Water Stewardship*, visa-se a implementação de sistemas de gestão sustentável do recurso água (<http://a4ws.org/>). Subjacente ao desenvolvimento de todas estas abordagens está o aumento da consciencialização sobre a importância dos recursos hídricos e da necessidade do seu uso racional e eficiente (Gleick, 1993; Lundqvist, 2000; European Environment Agency, 2009; Cook e Bakker, 2012; Cosgrove, 2013; WWAP, 2016) e a mudança de perspectiva em relação às questões da água, que passaram a ser vistas como problemas globais e não apenas locais (Postel *et al.*, 1996; Vörösmarty *et al.*, 2000; 2010; Hoekstra e Mekonnen, 2011; 2012).

No entanto, a aplicação destas metodologias não é consensual, quer devido a ambiguidades nos critérios científicos que as sustentam (Berger e Finkbeiner, 2012; Gawel e Bernsen, 2013; Launiainen *et al.*, 2013; Chenoweth *et al.*, 2014; Perry, 2014; Wichelns, 2010, 2015; 2017; Quinteiro *et al.*, 2015, 2017; Christ e Burrit, 2017; Sutterlüty *et al.*, 2017), quer pelo facto de poderem facilmente ser mal percebidas pelo público (Sutterlüty *et al.*, 2017). Teme-se que estas limitações possam eventualmente conduzir à adopção de políticas, orientações e novas legislações desajustadas da realidade. Ainda assim, as metodologias de avaliação do uso da água tornaram-se poderosos instrumentos de comunicação cuja influência e aceitabilidade social é muito relevante em diversas actividades (Christ e Burrit, 2017; Sutterlüty *et al.*, 2017), como é o caso da indústria de pasta e papel.

Compreende-se assim que a aplicação do conceito de pegada hídrica da *Water Footprint Network* ao sector da pasta e do papel (van Oel e Hoekstra, 2010, 2012) e a referência ao valor de 10 litros de água por folha A4 de papel (dos quais 9,94 são atribuídos à evapotranspiração da floresta), tenha sido contestada, quer pela indústria internacional (UPM-Kymmene, 2011; CEPI, 2012; Fibria, 2015) quer por alguns membros da comunidade científica (Launiainen *et al.*, 2013; Sutterlüty *et al.*, 2017).

## 1.2 Identificação dos objectivos

No presente trabalho pretende-se actualizar conceitos e informação de base, sobre as relações entre a floresta de *Eucalyptus globulus* e os recursos hídricos, que permitam uma análise crítica, actual e abrangente, da componente da “água verde” do conceito WFN.

Para além da abordagem de questões teóricas, serão feitas análises concretas para dois exercícios de cálculo, representativos da produção florestal em Portugal a montante da fase industrial.

Com este trabalho pretende-se também clarificar alguma polémica que possa, eventualmente, surgir sobre a existência e localização de fábricas de pasta e papel em regiões com escassez de água, ou com recursos hídricos abundantes.

Para além disso, é fundamental fazer alguma pedagogia, através da divulgação de conceitos de base e de resultados de investigação, que possibilite uma percepção pública, mais fundamentada, das relações entre florestas e água e dos impactos do sector da pasta e do papel nos recursos hídricos nacionais.

Este trabalho enquadra-se nos desenvolvimentos internacionais sobre o tema “Eficiência do uso da água pela indústria europeia de pasta e papel”, que têm vindo a ser discutido no seio da CEPI – *Confederation of European Paper Industry*, bem como nos seus grupos técnicos de referência (*CEPI - Water Reference Group e Forest and Water Issue Group*).

Um dos grandes desafios, será também contribuir para o desenvolvimento de um guia sectorial visando auxiliar as empresas a serem resilientes aos riscos associados aos recursos hídricos, através do aumento da sua credibilidade. Pretende-se contribuir para abrir caminho para futuros trabalhos e desenvolvimento de novos casos de estudo no âmbito da relação entre a indústria papeleira e os recursos hídricos.

## **2. Revisão da literatura**

### **2.1 Enquadramento Legislativo Nacional e Internacional da Água**

O Principal instrumento da Política da União Europeia relativo à Água é a Directiva Quadro da Água (Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e Conselho, de 23 de Outubro de 2000 (Directiva Quadro da Água, 2000)), estabelecendo um quadro de acção comunitária para a protecção das águas de superfície interiores, das águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas.

Foi transposta para o direito nacional através da Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, alterada e republicada pelo Decreto-Lei n.º 130/2012, de 22 de Junho.

Com a aprovação da Directiva Quadro da Água (DQA), em 2000, as políticas públicas europeias da água assumiram como objectivo último, assegurar o bom estado das massas de água até 2015, definindo para cada Estado - Membro os planos de gestão de região hidrográfica (PGRH) como os instrumentos para esse fim (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013).

O Decreto-Lei n.º 76/2016, de 9 de Novembro, aprovou o Plano Nacional da Água (PNA) (APA, 2015), nos termos do n.º 4 do artigo 28.º da Lei da Água, aprovada pela Lei n.º 58/2008, de 31 de Maio, e cria a Comissão Interministerial de Coordenação da Água.

O PNA pretende ser um plano abrangente, mas pragmático, enquadrador das políticas de gestão de recursos hídricos nacionais, dotado de visão estratégica e assente numa lógica de protecção do recurso e da sustentabilidade do desenvolvimento socio-económico nacional.

Assim, a gestão das águas deverá prosseguir três objectivos fundamentais: a protecção e a requalificação do estado dos ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como das zonas húmidas que deles dependem, no que respeita às suas necessidades de água; a promoção do uso sustentável, equilibrado e equitativo de água de boa qualidade, com a afectação aos vários tipos de usos, tendo em conta o seu valor económico, baseada numa protecção a longo prazo dos recursos hídricos disponíveis; e o aumento da resiliência relativamente aos efeitos das inundações e das secas e outros fenómenos meteorológicos extremos decorrentes das alterações climáticas.

O PNA aponta também as grandes linhas prospectivas da referida política para o período 2022-2027, que correspondem ao 3º ciclo de planeamento da DQA.

As Indústrias nacionais e, em particular, a indústria portuguesa de pasta, papel e cartão, têm a obrigatoriedade de se orientar por estas Directivas, e por outros instrumentos de política dos recursos hídricos.

A nível nacional, as políticas da água têm objectivos muito concretos, determinando uma nova atitude na gestão e na prática do uso de água. Um exemplo de um instrumento de política ambiental a nível nacional é o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA) (APA, 2012). O PNUEA surgiu no seguimento do impacto significativo que a seca de 2005 teve em algumas regiões do país, tendo a sua operacionalização ficado a cargo de um grupo de trabalho interministerial criado em 2006. Este programa visa essencialmente a promoção do uso eficiente da água, e a minimização do risco de escassez hídrica em geral, e nos sectores urbano, agrícola e industrial em particular. Com a aplicação do PNUEA, pretende-se ainda alcançar uma redução dos volumes de cargas poluentes rejeitadas para os meios hídricos e a redução dos consumos de energia, aspectos fortemente dependentes dos usos da água.

A nível internacional, de modo a completar o quadro legal europeu em matérias relacionadas com a gestão da água, a Comissão Europeia elaborou o *Blueprint to Safeguard Europe's Water* (Comissão Europeia, 2012). Este documento baseou-se nos resultados preliminares da análise dos desafios-chave enfrentados pelos recursos hídricos da Europa e identificados na implementação da política da água da UE. Este documento representa a matriz destinada a preservar os recursos hídricos da Europa, que constitui a base da política da água da UE até 2020, em alinhamento com a estratégia UE 2020 e com o roteiro para a eficiência na utilização de recursos aí incluídos. O *Blueprint* tem como objectivos: a revisão da acção europeia sobre cheias e secas, a avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos às alterações climáticas e a outras pressões antropogénicas, uniformizar a política europeia da água no quadro de uma melhor regulação ambiental comunitária. A análise expressa no *Blueprint* cobre um intervalo temporal alargado até 2050, esperando-se que seja um documento orientador da política de longo prazo da UE para a água.

Salienta-se ainda que a “Agenda das Florestas e Água” (FAO, 2013) nos últimos 12 anos veio divulgar um maior conhecimento, a nível internacional, sobre as interacções entre a floresta-água e a importância das árvores e das florestas na regulação e no abastecimento de água de alta qualidade. A “Agenda das Florestas e Água” engloba organizações internacionais, a academia, a sociedade civil, organizações não governamentais e o sector privado. No principal objectivo da “Agenda para as Florestas e Água” está um Plano de Acção a 5 anos, que visa compreender e ligar as diferentes funções da floresta com as necessidades de abastecimento de água para a humanidade, garantido que as interacções florestas-água sejam consideradas e integradas na ciência, nos instrumentos de política e nas práticas de gestão a todos os níveis (da árvore ao povoamento, às águas superficiais e subterrâneas, e às escalas regional, nacional e global).

## 2.2 Enquadramento Científico

As florestas influenciam o ciclo hidrológico, afectando processos como a interceptação, a transpiração, a infiltração, a recarga das águas subterrâneas e o escoamento (Bonan, 2008; van der Ent, 2012, 2014; Ellison *et al.*, 2012, 2017).

Deste modo, a existência de extensas áreas florestais tem necessariamente impactos, positivos ou negativos, sobre os recursos hídricos (Andréassian, 2004). A classificação (e quantificação) desses impactos deve ser feita atendendo às particularidades de cada sistema, em função dos objectivos de gestão considerados e das exigências específicas das actividades que se encontram a jusante das áreas florestais (Ellison *et al.*, 2012).

Dada a dificuldade em definir o que é positivo ou negativo fora de um contexto claro de opções de desenvolvimento, cabe às instituições públicas e privadas, a nível local e nacional, assumir o seu papel na tomada de decisão (Calder, 2007).

A utilização local de água pela vegetação (natural ou plantada) não deverá ser vista apenas como um desperdício de um recurso limitado (Hoekstra, 2009), mas antes como parte de um processo natural (de utilização da água) através do qual se produzem bens e serviços (por exemplo, madeira, frutos, material vegetal verde, sequestro de carbono, protecção do solo), com um determinado valor económico e ambiental (Jackson *et al.*, 2005; Bonan, 2008; Ellison *et al.*, 2012). A consideração destes aspectos é também fundamental para a gestão adequada dos recursos hídricos (David *et al.*, 2011; Ellison *et al.*, 2017).

A gestão dos recursos hídricos deve fazer-se preferencialmente ao nível das bacias hidrográficas, unidades em que análise dos problemas hidrológicos é mais fácil de equacionar (Bosch e Hewlett, 1982; Zhang *et al.*, 2001; Andréassian, 2004; Brown *et al.*, 2005; Farley *et al.*, 2005). Dado que as florestas e sistemas agro-florestais ocupam normalmente a parte de montante das bacias, é fundamental o conhecimento das suas influências no comportamento hidrológico local (David *et al.*, 2011).

O *Eucalyptus globulus*, espécie originária do sul da Austrália, detém hoje a primeira posição em termos de área florestal ocupada em Portugal (Instituto da Conservação da Natureza e Florestas (ICNF), 2013).

Os povoamentos são geridos como sistemas especializados de silvicultura intensiva para a produção de madeira para pasta e papel de escrita de alta qualidade (ICNF, 2013). Normalmente plantadas com densidades (número de árvores por hectare) e produções elevadas, têm sido alvo de controvérsia (Calder *et al.*, 2004) devido aos elevados consumos hídricos e à redução de escoamento (produção de água) a jusante das áreas plantadas (Sharda *et al.*, 1988; David *et al.*, 1994; Soares e Almeida, 2001;



Forrester *et al.*, 2010; Huber *et al.*, 2010; Rodríguez-Suárez *et al.*, 2011; Booth, 2013; Venkatesh *et al.*, 2014).

Neste contexto, o uso da água pela indústria e a eficiência do uso da água pelas florestas plantadas são questões fundamentais para os proprietários florestais, para a indústria florestal e para o ordenamento e gestão do território.

Neste capítulo pretende-se rever, de forma simplificada, conceitos fundamentais que permitem compreender e avaliar os consumos hídricos pelas plantações florestais e fazer o seu enquadramento ao nível da bacia hidrográfica.

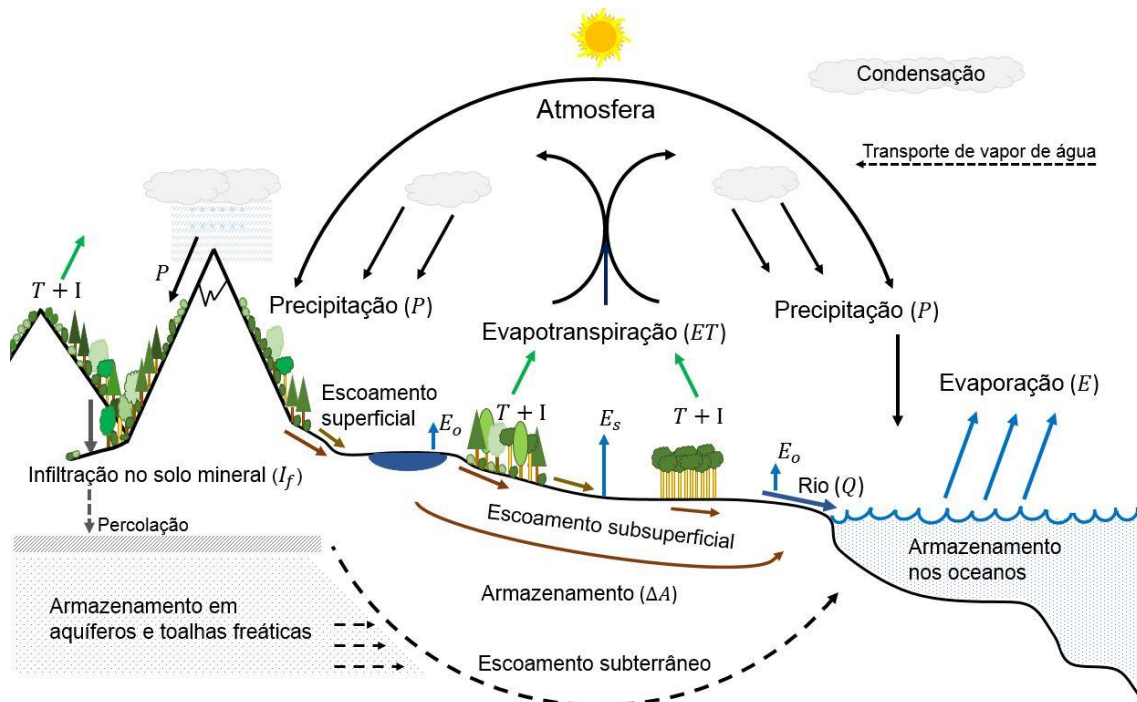
O capítulo está estruturado em duas grandes secções: o ciclo hidrológico a nível planetário; o balanço hidrológico de bacias, suas componentes e possíveis influências das florestas.

### **2.2.1 O Ciclo Hidrológico Global – Sistema Fechado**

A água é um elemento fundamental do planeta Terra (Lee, 1980), cobrindo aproximadamente 70% da sua superfície (Oki, 2005). Toda a água que existe na Terra teve origem no intenso vulcanismo de eras passadas, que libertou dos magmas para a atmosfera grandes quantidades de água na forma de vapor de água (Hartmann, 2016). Ao longo do tempo, o vapor de água libertado originou os oceanos, criando condições para a estabilização do clima e para o desenvolvimento da vida tal como a conhecemos (Hartmann, 2016).

Estima-se que o volume total de água existente na Terra, em todos os seus reservatórios (oceanos, glaciares e calotes polares, aquíferos, rios, lagos, solo, permafrost, neves e gelos permanentes, seres vivos e atmosfera), se aproxime de um valor constante no tempo (à escala de eras geológicas) de ca.  $1,386 \times 10^9 \text{ km}^3$  (Shiklomanov, 1993).

A água está, no entanto, em constante movimento e mudanças de estado, numa sequência contínua e complexa de processos que resultam na permanente troca de água entre os oceanos, a atmosfera e os continentes (Hartmann, 2016). O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o modelo conceptual que descreve todos esses processos a nível planetário (Chahine, 1992) (Figura 2.1.).



**Figura 2.1: O Ciclo Hidrológico Global.**

**Os símbolos não identificados são:  $T$ : transpiração;  $I$ : perdas por interceptação;  $E_s$ : evaporação do solo;  $E_o$ : evaporação de superfícies aquáticas;  $Q$ : escoamento**

(Adaptado de Hewlett, 1982).

O ciclo hidrológico está associado à circulação atmosférica, originada pela energia solar e pelo aquecimento diferencial da superfície da Terra e da atmosfera em latitude (Peixoto e Ort, 1992). É também o Sol que fornece a energia necessária à passagem da água do estado líquido ao estado gasoso (evaporação) (Hartmann, 2016). Uma vez na atmosfera, o vapor de água pode ascender, arrefecendo e induzindo a condensação e a precipitação. Conforme a força promotora do processo de ascensão do vapor de água na atmosfera, a precipitação pode ser de origem convectiva, frontal e/ou orográfica (Shaw *et al.*, 2011).

Anualmente, o ciclo hidrológico global é alimentado com aproximadamente  $500000 \text{ km}^3$  de água evaporada para a atmosfera e que retorna à superfície terrestre como precipitação (Oki, 2005). Os oceanos e as superfícies continentais contribuem de forma diferenciada para a evaporação global: aproximadamente 86% e 14%, respetivamente (Kuchment, 2004; Oki, 2005).

Sobre os oceanos, a evaporação excede a precipitação. Aproximadamente 90% da água evaporada sobre os oceanos retorna aos oceanos como precipitação. Cerca de 35% da precipitação total registada sobre os continentes tem origem em vapor de água evaporado dos oceanos (Fig. 2.1). Os restantes 65% da precipitação registada sobre os

continentes correspondem a água reciclada nas próprias massas continentais (Chahine, 1992). Sobre os continentes, a precipitação excede a evaporação, retornando o excesso, em média 1/3 da precipitação continental, aos oceanos sob forma de escoamento (Fig. 2.1) (Kuchment, 2004; Trenberth *et al.*, 2007).

Eventualmente, toda a água precipitada acaba por ser evaporada de novo, perpetuando o ciclo, sendo esta renovação fundamental para manter as disponibilidades hídricas no planeta (Peixoto e Ort, 1992).

À escala global, a água move-se assim num sistema fechado, i.e. volume total de água é relativamente constante, sem entradas nem saídas significativas (Peixoto e Ort, 1992; Hartmann, 2016).

Apesar das dificuldades relacionadas com a quantificação exacta do volume de água em cada reservatório (Trenberth *et al.*, 2007), estima-se que os oceanos representem aproximadamente 96,5% de todas as existências, estando os remanescentes 3,5% distribuídos pelos restantes reservatórios (glaciares e calotes polares, aquíferos, rios e lagos, solo, atmosfera e seres vivos) (Shiklomanov, 1993).

O volume de água doce (não salgada) representa uma parte muito pequena do volume de água total na Terra (ca. 2,5%) (Chahine, 1992; Shiklomanov, 1993). Aproximadamente 99% deste volume corresponde a águas subterrâneas e a água armazenada em glaciares, calotes polares e zonas de neve e gelo permanente ou de permafrost.

Num determinado momento, a atmosfera pode conter um volume médio de água aproximado de 13000 km<sup>3</sup> de vapor de água, ou seja, cerca de 0,001% da quantidade total de água existente, sendo, no entanto, o seu conteúdo em água completamente renovado cerca de 30-40 vezes por ano, ou seja, a cada nove ou dez dias (Chahine, 1992; Hartmann, 2016).

A água doce superficial disponível para utilização directa humana é uma parte ínfima do volume total de água existente (ca. 0,008%) (Chahine, 1992; Shiklomanov, 1993). No entanto, a circulação contínua de água entre os oceanos, a atmosfera e os continentes, assegura a sua renovação (Peixoto e Ort, 1992).

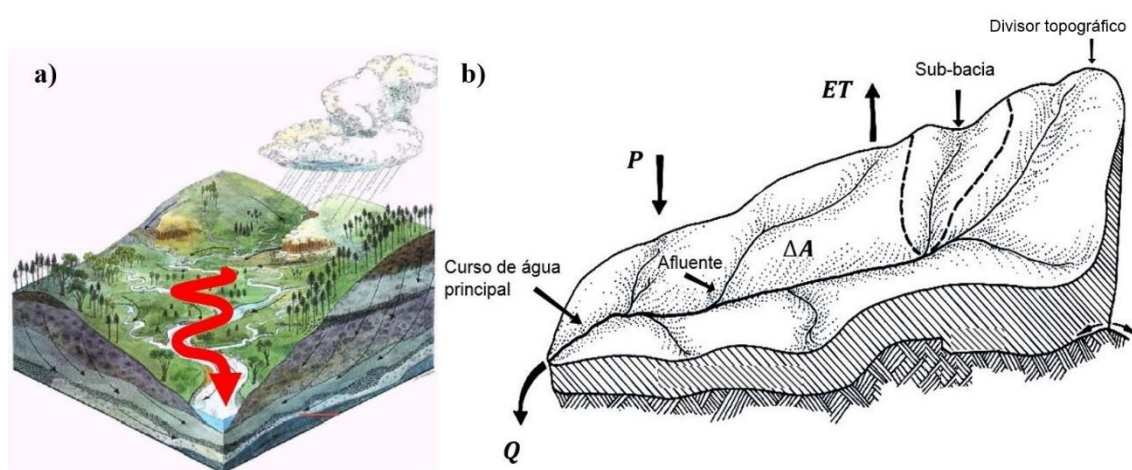
### **2.2.2 Bacia Hidrográfica – Sistema Aberto – O Impacto das florestas**

Se ao nível planetário a água circula num sistema fechado, sem entradas nem saídas, quando se reduz a escala de análise para uma parcela da superfície continental, passa-

se obrigatoriamente para um sistema aberto (Ward e Robinson, 2000), e a noção de ciclo dá lugar à de balanço.

A unidade clássica de análise da fase terrestre do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica (Hewlett, 1982). Uma bacia hidrográfica corresponde à área de captação natural dos fluxos de água originados pela precipitação que convergem para um ponto comum de drenagem (Fig. 2.2a) (Lee, 1980). É delimitada por divisores topográficos, ou seja, linhas de cota mais elevada que a separam de bacias vizinhas (Fig. 2.2b) (Ward e Robinson, 2000).

A bacia hidrográfica é um sistema físico sujeito a entradas de água concentradas no tempo (eventos de precipitação) que gera saídas de água relativamente distribuídas no tempo (escoamento e evapotranspiração) (Fig. 2.2b) (Hartmann, 2016).



**Figura 2.2: Representação esquemática de uma bacia hidrográfica, com identificação das entradas e saídas do sistema**

(Adaptado de Hewlett, 1982)

A quantificação do movimento e armazenamento de água numa bacia hidrográfica, num determinado período de tempo, pode ser obtida com base no princípio da conservação de massa: soma das entradas (+) e saídas (-) é igual à variação do armazenamento (Hewlett, 1982; Ward e Robinson, 2000). Obtém-se assim a equação do balanço hidrológico de bacias (Lee, 1980):

$$P = Q + ET \pm \Delta A, \quad (2.1)$$

em que  $P$  é a precipitação,  $Q$  o escoamento na linha de água,  $ET$  a evapotranspiração e  $\Delta A$  a variação no armazenamento de água no interior da bacia.  $P$  representa a entrada

de água na bacia e  $Q$  e  $ET$  correspondem às saídas. Admitindo que a variação do armazenamento é próxima de zero ( $\Delta A \approx 0$ ) à escala anual, estando apenas sujeita a flutuações sazonais, a equação 2.1 pode ser reescrita para o balanço anual como (Lee, 1980; Ward e Robinson, 2000):

$$P = Q + ET. \quad (2.2)$$

$Q$  é o escoamento fluvial anual (somatório de todos os processos de escoamento de resposta à precipitação; ver Fig. 2.1) e representa a produção de água de uma bacia, i.e., a parte da precipitação que cai nos limites de uma bacia e não evapora, ficando disponível para ser usada a jusante no abastecimento urbano, industrial, agrícola ou recreativo (Lee, 1980; Hewlett, 1982).

O balanço de água de uma bacia hidrográfica é influenciado por factores, como a orientação e características geomorfológicas (área, comprimento, declive, forma, características do solo e subsolo, etc.) (Lee, 1980; Hewlett, 1982). No entanto, as características do uso do solo (coberto vegetal) podem ter grande importância ao afectarem o valor de  $ET$  e a dinâmica de  $Q$  (Lee, 1980).

Regra geral, a água da precipitação contribui mais para a evapotranspiração do que para o escoamento total e armazenamento em conjunto (Hewlett, 1982). Nas regiões temperadas, cerca de 70% da precipitação regressa à atmosfera como  $ET$  e apenas 30% contribui para o armazenamento ou para o escoamento (Hewlett, 1982). Na região mediterrânica, quase toda a precipitação é evapotranspirada e o escoamento anual é tipicamente  $\leq 10\%$  de  $P$  (David *et al.*, 2011).

Numa determinada região, a variação inter-anual da evapotranspiração é normalmente menor (é mais conservativa) do que a da precipitação e do escoamento (Lee, 1980; Hewlett, 1982). Ou seja, diminuições em  $P$  reflectem-se mais em decréscimos no escoamento do que na evapotranspiração (Lee, 1980).

Nas últimas décadas tem-se observado uma tendência de diminuição da precipitação na região do Mediterrâneo e os cenários de alterações climáticas prevêem que esta tendência se acentue no futuro, especialmente durante os períodos de Primavera e Verão (Miranda *et al.*, 2006; IPCC, 2014). Neste contexto, a redução das disponibilidades hídricas a nível regional pode implicar um aumento dos conflitos pelo uso da água. Dado que ao nível de uma pequena bacia hidrográfica não é possível agir sobre a entrada de água (precipitação), só se poderá alterar o balanço hidrológico agindo sobre o coberto vegetal, e consequentemente sobre a evapotranspiração, para diminuir, manter ou aumentar o escoamento ( $Q$ ).

### 2.2.2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração ( $ET$ ) corresponde ao conjunto de processos através dos quais a água no estado líquido, existente nas plantas, nos solos ou nos corpos de água, se converte em vapor de água libertado para a atmosfera (Monteith, 1973). Assim, a  $ET$  que sai de uma bacia corresponde é a soma de várias componentes:

$$ET = T + I + E_s + E_o \quad (2.3)$$

Em que,  $T$  representa a transpiração das plantas,  $I$  as perdas por interceptação, e  $E_s$  e  $E_o$  correspondem, respectivamente, à evaporação directa a partir do solo/superfícies molhadas ou a partir de zonas de água livre (Hewlett, 1982). Dado que, em áreas totalmente florestadas  $E_s$  e  $E_o$  são geralmente negligenciáveis (Lee, 1980), a  $ET$  nessas áreas pode ser aproximada a:

$$ET = T + I \quad (2.4)$$

A transpiração depende de tanto de fatores meteorológicos (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e humidade do ar), como de fatores fisiológicos (controlo estomático, características das folhas (área foliar, duração - perenes ou decíduas), tipo de copas e padrões de enraizamento), bem como do albedo<sup>1</sup> (McNaughton e Jarvis, 1983; Jewitt, 2005; Jones, 2014).

A quantidade total de água perdida por interceptação depende apenas de condicionantes físicas, nomeadamente da taxa de evaporação da água a partir do coberto molhado, da capacidade de armazenamento de água das copas e da distribuição e intensidade da precipitação (Ward e Robinson, 2000; David *et al*, 2005).

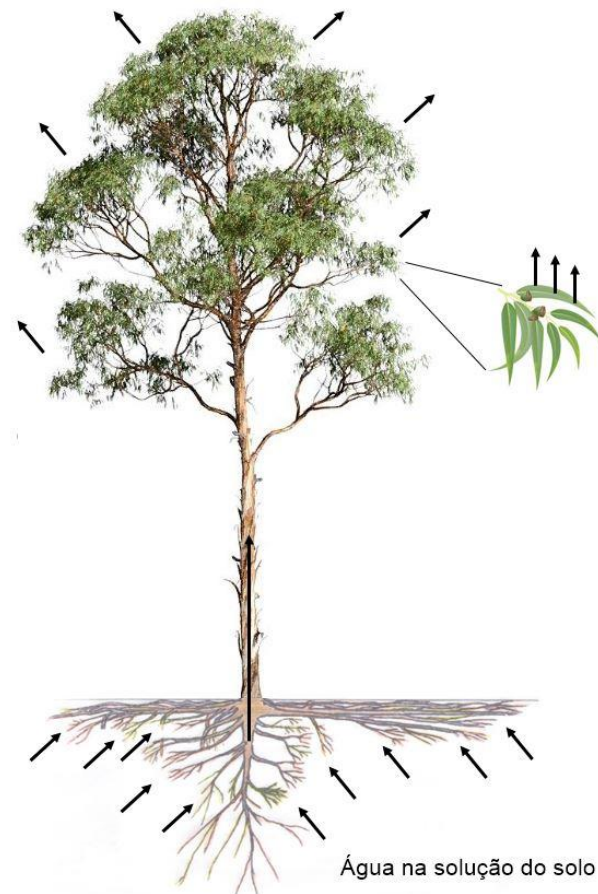
#### 2.2.2.1.1 Transpiração

A transpiração ( $T$ ) é o processo de passagem da água do solo para a atmosfera através das plantas, saindo por pequenos poros de abertura variável localizados na epiderme das folhas, os estomas (Taiz e Zeiger, 2006). A água é absorvida pelas raízes a partir do solo mineral e transportada em tecido vegetal especializado (xilema), até às folhas,

---

<sup>1</sup> Coeficiente de reflexão da superfície para a radiação solar.

onde é libertada para a atmosfera como vapor de água (Fig.2.3) (Steudle, 2001; Tyree e Zimmermann, 2002). Mais de 95% de toda a água absorvida pelas raízes é libertada por transpiração para a atmosfera (Taiz e Zeiger, 2006). A energia solar, promove a abertura dos estomas e induz a vaporização da água, conduzindo a uma diminuição do potencial de pressão na folha que funciona como a força motriz de sucção do processo transpiratório (Tyree e Zimmermann, 2002).



**Figura 2.3: Representação esquemática do movimento da água através da planta para sustentar a transpiração**

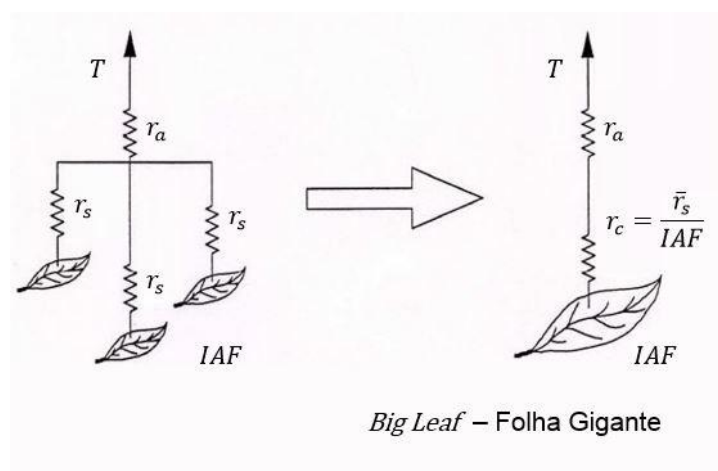
O condicionamento fisiológico da transpiração é exercido pela regulação da abertura dos estomas em resposta ao estado hídrico da planta e às condições ambientais (Jones, 2014).

Usualmente, considera-se que a transpiração é adequadamente descrita pela equação de Penman- Monteith (McNaughton e Jarvis, 1983):

$$\lambda ET = \frac{\Delta R_n + \rho \cdot c_p \cdot D / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (2.5)$$

em que  $ET$  é a taxa de transpiração,  $R_n$  a radiação líquida,  $D$  o déficit de pressão de vapor do ar,  $r_c$  a resistência do coberto,  $r_a$  a resistência aerodinâmica e  $\lambda$ ,  $\Delta$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  e  $\gamma$  são constantes físicas para dada temperatura (Monteith, 1973).

O modelo de Penman - Monteith integra um parâmetro fisiológico, resistência do coberto ( $r_c$ ), que traduz a influência fisiológica dos estomas assumindo que o coberto se comporta como uma única folha gigante isotérmica (Fig. 2.4) (Monteith, 1973). A outra resistência ao transporte de vapor considerada no modelo é a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), que traduz a influência da turbulência do ar na evaporação (McNaughton e Jarvis, 1983).



**Figura 2.4. Representação esquemática do modelo da folha gigante**

(Adaptado de Monteith, 1973 e Jones, 2014)

O modelo assume que a soma das resistências das folhas individuais ( $r_s$ ) é equivalente à resistência de um único plano foliar (resistência do coberto,  $r_c$ ), assumindo que o coberto se comporta uniformemente como uma folha gigante isotérmica,  $r_s$  é a resistência estomática e  $IAF$  o índice de área foliar.

Em cobertos florestais, a resistência do coberto ( $r_c$ ) é elevada relativamente a  $r_a$  (modelo de Penman-Monteith, (Equação 2.5, Fig. 2.4):  $r_c$  pode ser até 50 vezes superior a  $r_a$ , sendo a transpiração largamente determinada pela regulação estomática (McNaughton e Jarvis, 1983).

As espécies florestais variam consideravelmente ao nível das características que influenciam a transpiração, nomeadamente: a altura, a área foliar, a resistência dos estomas, a duração das folhas, e o padrão de enraizamento e a profundidade do sistema radicular (Chaves *et al.*, 2002; Schlesinger e Jasechko, 2014). As taxas de transpiração dependem fortemente do índice de área foliar e das fontes de água a que as raízes têm acesso (McNaughton e Jarvis, 1983; Jewitt, 2005).

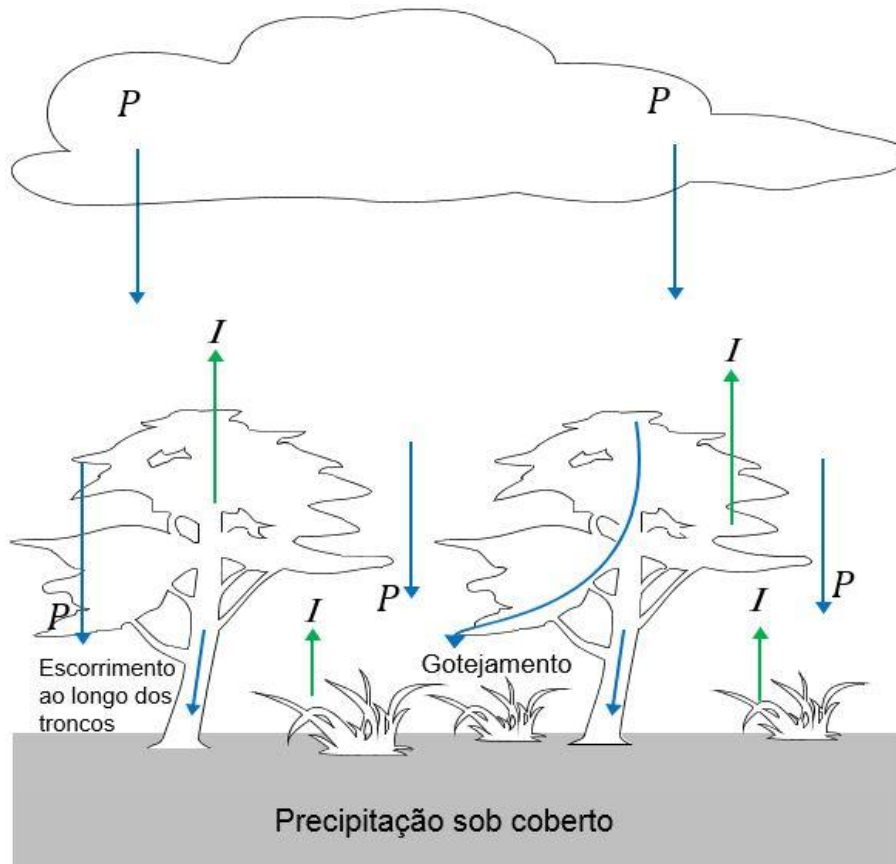


O menor albedo das superfícies florestais influencia também a transpiração, ao alterar o balanço de radiação (maior  $R_n$  disponível nas florestas) (Peixoto e Ort, 1992; Bonan, 2008).

#### **2.2.2.1.2 Perdas por interceptação pelo coberto vegetal**

Quando a chuva cai sobre uma superfície vegetal, uma parte da água não chega a atingir o solo pois é interceptada pelas folhas, ramos e flores ou frutos, ficando temporariamente retida (Ward e Robinson, 2000; David *et al.*, 2005). Da água retida, uma parte (ou a totalidade) pode evaporar-se directamente para atmosfera a partir superfície molhada das plantas, constituindo a perda por interceptação ( $I$ ) (Ward e Robinson, 2000; David *et al.*, 2005). A restante precipitação acaba por drenar e atingir o solo, por gotejamento a partir das folhas, passando em aberturas, ou por escoamento ao longo dos troncos, constituindo a precipitação sob coberto (Fig.2.5) (David *et al.*, 2005). Assim a quantidade de água que efectivamente chega ao solo numa área florestal ou com qualquer outro tipo de coberto vegetal, é normalmente inferior à precipitação que atinge o topo das copas (precipitação bruta) (Fig. 2.5) (Ward e Robinson, 2000).

A quantidade total de água que se evapora, a partir do coberto molhado depende das condicionantes meteorológicas do poder evaporativo da atmosfera (radiação e défice de pressão de vapor), das características e do regime da precipitação (frequência e intensidade da chuva) e da morfologia e estrutura do coberto vegetal que influenciam a capacidade de armazenamento de água das copas (Ward e Robinson, 2000; David *et al.*, 2005). A interceptação é maior em regiões onde o regime de precipitação se caracteriza por eventos pouco intensos mas muito frequentes e menor em regiões com regime de precipitação de tipo torrencial, com eventos intensos mas pouco frequentes (como é o caso do clima mediterrânico) (McNaughton e Jarvis, 1983). Nos povoamentos florestais, as diferenças na capacidade de armazenamento das copas também influenciam  $I$ , sendo geralmente aceite que as copas das coníferas têm maior capacidade de armazenamento do que as copas das folhosas (nomeadamente nas de hábito decíduo) (Ward e Robinson, 2000; David *et al.*, 2005).



**Figura 2.5: Representação esquemática dos processos que constituem as perdas por interceptação**

(Adaptado de David *et al.*, 2005).

Quando as copas estão molhadas, a evaporação é um processo físico não dependente da regulação estomática (Ward e Robinson, 2000). A taxa de evaporação da água interceptada pode ser descrita através da Equação (2.5), com  $r_c = 0$  (David *et al.* 2005):

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + \rho \cdot c_p \cdot D / r_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.6)$$

A taxa de evaporação ( $E$ ) da água retida pela vegetação depende essencialmente da radiação ( $R_n$ ), do déficit de pressão de vapor do ar circundante ( $D$ ) e da resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) (David *et al.*, 2005). A resistência aerodinâmica depende da rugosidade aerodinâmica do coberto e da velocidade do vento (Monteith, 1973).

Em comparação com vegetação rasteira, os cobertos florestais têm maior rugosidade aerodinâmica (menor  $r_a$ ) sendo por isso a taxa de evaporação da água interceptada mais elevada (David *et al.*, 2005). Tal como na transpiração o menor albedo das florestas disponibiliza uma maior radiação líquida ( $R_n$ ) para a evaporação (Peixoto e Ort, 1992).

A perda por intercepção pode representar 25 a 75 % da evaporação total e cerca de 9 a 60% da precipitação bruta, dependendo do regime de precipitação e do tipo de floresta (ver referências em David *et al.*, 2005). Esta ampla variação deve-se sobretudo a diferenças nos padrões de distribuição da precipitação aos diferentes tipos de coberto florestal. Apesar de  $I$  de ser relativamente menos importante nos climas mediterrânicos (aproximadamente 25% de  $ET$ ) do que nas regiões de clima temperado, continua a ser uma importante componente do balanço hidrológico das bacias florestadas (David *et al.*, 2006; Paço *et al.*, 2009).

### **2.2.3 As florestas e a evapotranspiração - Tendências gerais.**

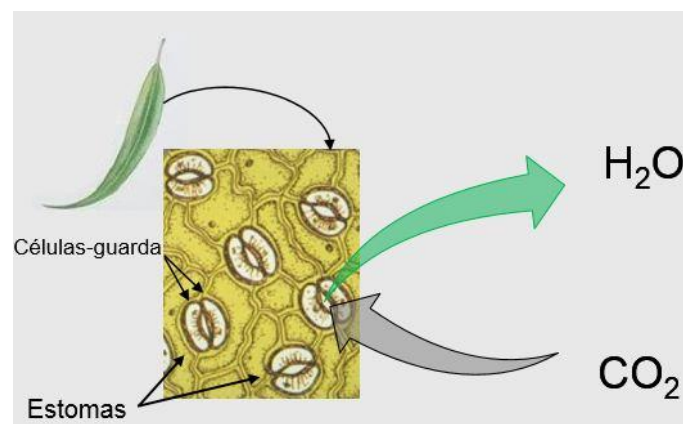
As florestas ocupam cerca de 42 milhões de km<sup>2</sup> nas regiões tropicais, boreais e temperadas (Bonan, 2008), ou seja aproximadamente 30% da área total das superfícies continentais (Jewitt, 2005). O papel das florestas no balanço hidrológico tem sido motivo de controvérsia ao longo do tempo (Lee, 1980, Andréassian, 2004, Jewitt, 2005; Ellison *et al.*, 2012; van der Ent *et al.*, 2012, 2014). Atualmente é geralmente aceite que as florestas influenciam o balanço hidrológico e a qualidade e quantidade dos recursos hídricos disponíveis ao nível das bacias (Bosch e Hewlett, 1982; Zhang *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2005). Apesar de, pontualmente, as florestas poderem influenciar positivamente o balanço hidrológico de uma região (Hoffmann e Jackson, 2000; D'Almeida *et al.*, 2007, Calder, 2007), os resultados de quase todos os estudos sugerem que, tanto em climas húmidos como em climas secos, e apesar das diferenças observadas entre diferentes espécies florestais e diferentes tipos de florestas, a evapotranspiração anual é geralmente maior e, conseqüentemente, a produção total de água ( $Q$ ) menor em bacias florestadas do que em bacias com vegetação de porte rasteiro ou com culturas não irrigadas (Bosch e Hewlett, 1982; Calder, 1998; Zhang *et al.*, 2001; Robinson *et al.*, 2003; Andréassian, 2004; Brown *et al.*, 2005; Farley *et al.*, 2005; Jackson *et al.*, 2005) (ver equação 2.2).

Em relação a cobertos vegetais de menor porte, como por exemplo uma pastagem, as florestas têm maior evapotranspiração, através de características que influenciam os vários sub-processos da  $ET$  (Jewitt, 2005): maior rugosidade aerodinâmica das copas das árvores (maior turbulência no copado) - maior perda por intercepção ( $I$ ); maior extensão e profundidade de enraizamento - maior transpiração ( $T$ ); menor albedo (mais radiação líquida disponível) - maiores  $I$  e  $T$ .

O grau com que estas características influenciam a  $ET$  depende do clima e do tipo de floresta: densidade, área foliar, características do sistema radicular, espécie, duração das

folhas, idade dos povoamentos, ações de gestão florestal. Por exemplo, a evapotranspiração tende a ser maior em florestas de espécies de folha persistente do que em florestas de espécies de folha caduca ( $T$  e  $I$  limitadas a alguns meses do ano). Florestas menos densas evapotranspiram necessariamente menos. As opções de gestão florestal, ao condicionarem a escolha da espécie e influenciarem aspetos como a densidade dos povoamentos, o índice de área foliar e a duração da rotação influenciam fortemente a evapotranspiração. As plantações florestais intensivas têm normalmente maiores densidades de árvores e maiores índices de área foliar, tendo normalmente maiores taxas de evapotranspiração (Jackson *et al.*, 2005; Bonan, 2008). A evaporação da água intercetada ( $I$ ) corresponde a uma perda líquida de água da precipitação sem que haja qualquer contrapartida de assimilação fotossintética de carbono e acumulação de biomassa (David *et al.*, 2005).

Pelo contrário, a transpiração ( $T$ ) tem como retorno a produção de biomassa pelo que não pode ser encarada como uma perda absoluta. De facto, a transpiração tem como principal efeito manter os estomas abertos (células guarda hidratadas) permitindo a entrada de dióxido de carbono pelos mesmos estomas (Manzoni *et al.*, 2013) (Figura 2.6). A transpiração é, assim, o “custo” em água da fotossíntese e da produção de biomassa – é o conhecido *trade-off* de carbono por água (Jackson *et al.*, 2005). A razão entre a biomassa produzida e a correspondente transpiração é conhecida por eficiência do uso da água ( $EUA$ ) (Jones, 2014).



**Figura 2.6: Esquema exemplificando as trocas gasosas**

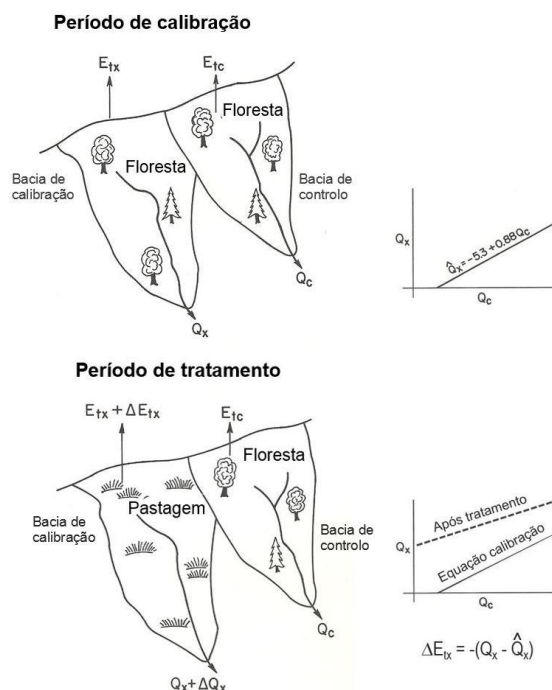
Numa análise global recente, incluindo resultados de 81 estudos, em que foi feita a partição entre os componentes da evapotranspiração, verificou-se que, apesar da elevada variabilidade entre regiões e ecossistemas, em média, a transpiração é responsável por 61% da  $ET$  (Schlesinger e Jasechko, 2014). Em condições de climas de tipo mediterrânico, prevalentes em Portugal, com a precipitação maioritariamente

concentrada nos meses de Outubro a Maio, a transpiração é o processo dominante da  $ET$  ( $T \approx 72-76\%$  de  $ET$ , David *et al.*, 2006; Paço *et al.*, 2009). O que é o oposto ao que acontece nos climas temperados húmidos, onde  $I$  prevalece sobre  $T$  (McNaughton e Jarvis, 1983).

## 2.2.4 Escoamento

O efeito do coberto vegetal no escoamento total anual de uma bacia hidrográfica ( $Q$ ) tem sido classicamente avaliado pelo método dos pares de bacias (Hewlett, 1982; Brown *et al.*, 2005). Este método de medição da influência da vegetação no escoamento precedeu, curiosamente, os aspetos teóricos e práticos relativos ao processo evaporativo em florestas anteriormente descritos (Andréassian, 2004).

A monitorização é feita em duas bacias hidrográficas adjacentes (bacia de controlo, Bacia C, e bacia de tratamento, Bacia X), escolhidas por semelhança no que concerne ao coberto vegetal, características morfológicas e potencial para instalar os instrumentos para medir o escoamento nos cursos de água principais (Fig 2.7) (Hewlett, 1982). Durante os anos iniciais, período de calibração,  $P$  e  $Q$  são monitorizados continuamente em ambas as bacias sem haver lugar a qualquer tipo de intervenção. Estuda-se então a relação estatística entre  $Q_c$  e  $Q_x$  para o período de calibração e obtém-se a equação de calibração (Hewlett, 1982).



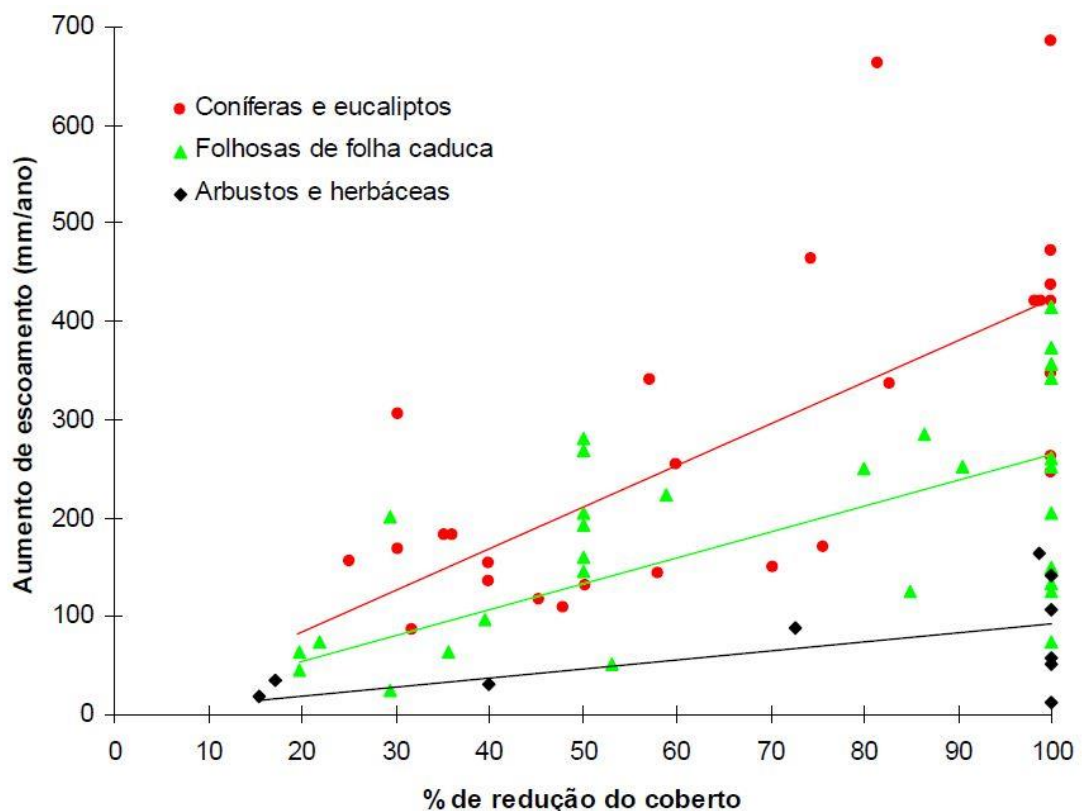
**Figura 2.7: Método dos pares de bacias**

(Adaptado de Hewlett, 1982)

Findo o período de calibração, realiza-se o “tratamento” na Bacia X, mantendo a bacia de controlo inalterada (Bacia C). O tratamento pode implicar o corte total ou parcial da floresta, fogo, substituição por pastagem (exemplo dado na Fig. 2.7) ou por outro tipo de floresta. É possível estimar o impacto do tratamento no escoamento da seguinte forma: *i)* a partir do valor atual medido de  $Q_c$  e da equação de calibração, estima-se o valor de  $Q_x$  antes do tratamento; *ii)* a diferença entre o valor atual de  $Q_x$  (pós-tratamento) e o estimado pela equação de calibração (pré-tratamento) dá-nos uma medida do efeito da alteração do coberto vegetal (tratamento) em  $Q_x$  (no caso da Fig. 2.7, substituição de floresta por pastagem).

Assumindo que as condições atmosféricas afetam igualmente as duas bacias, as diferenças em  $Q_x$  após o tratamento (mudança de coberto vegetal) podem considerar-se uma consequência direta de alterações na evapotranspiração.

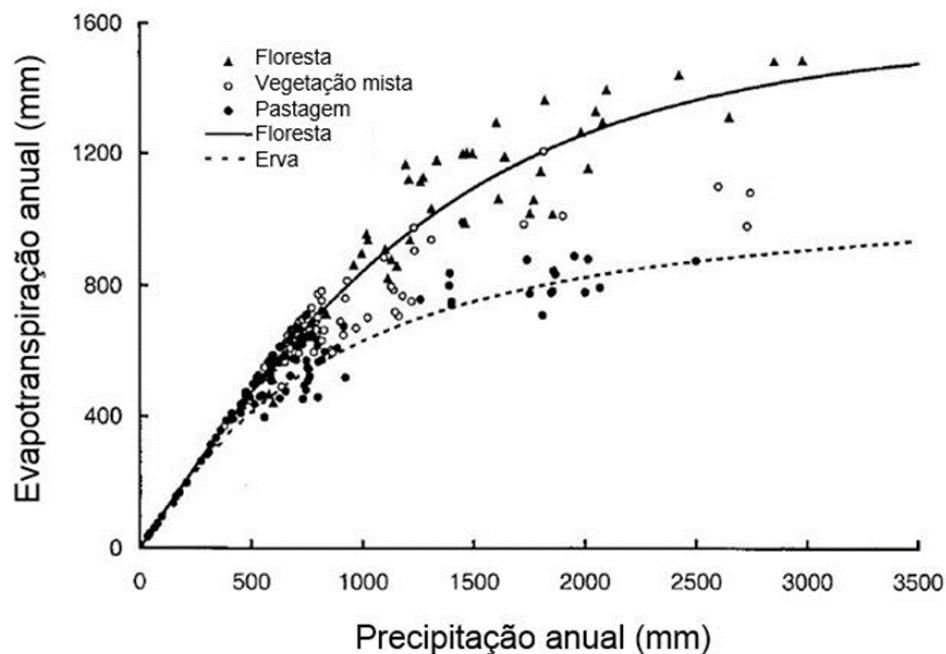
A Figura 2.8 sumariza grande parte dos estudos realizados em pares de bacias em todo mundo sobre o efeito da vegetação no escoamento anual (Bosch e Hewlett, 1982).



**Figura 2.8: Efeitos do coberto florestal no escoamento anual**

**As linhas de tendência foram estimadas a partir dos resultados obtidos em 75 estudos em diferentes locais do globo e representam os aumentos e decréscimos em  $Q$  decorrentes do aumento ou remoção da vegetação (Adaptado de Bosch e Hewlett, 1982).**

Os resultados mostram que reduções do coberto (Fig 2.8, abcissas da esquerda para a direita) traduzem-se sempre num aumento do escoamento anual (redução em *ET*). Aumentos no coberto (Fig. 2.8, abcissas da direita para a esquerda) refletem-se em diminuições do escoamento anual (aumento em *ET*). Estes efeitos são maiores em florestas do que em vegetação rasteira, e, dentro das florestas, maiores nas consideradas “grandes evaporadoras” (eucaliptos e coníferas) (Bosch e Hewlett, 1982). Usando dados semelhantes (mas mais abrangentes, i.e., maior base de dados) e considerando a precipitação, Zhang *et al.* (2001) confirmaram que a evapotranspiração anual (estimada pela Eq. (2) do balanço anual de bacias) é geralmente mais elevada em bacias florestadas do que em bacias não florestadas, principalmente em regiões com maior precipitação anual (Fig. 2.9). Os resultados sugerem que existe um limiar de precipitação anual, aproximadamente 700 mm ano<sup>-1</sup>, abaixo do qual a evapotranspiração é igual à precipitação independentemente do tipo de vegetação. Jackson *et al.* (2005) analisaram um conjunto de resultados de 504 estudos realizados em bacias hidrográficas de todo o mundo e verificaram que a plantação de florestas diminuiu significativamente (menos 38%, em média) o escoamento total em bacias e que, em cerca de 13% dos casos, os cursos de água secaram por períodos de pelo menos 1 ano.

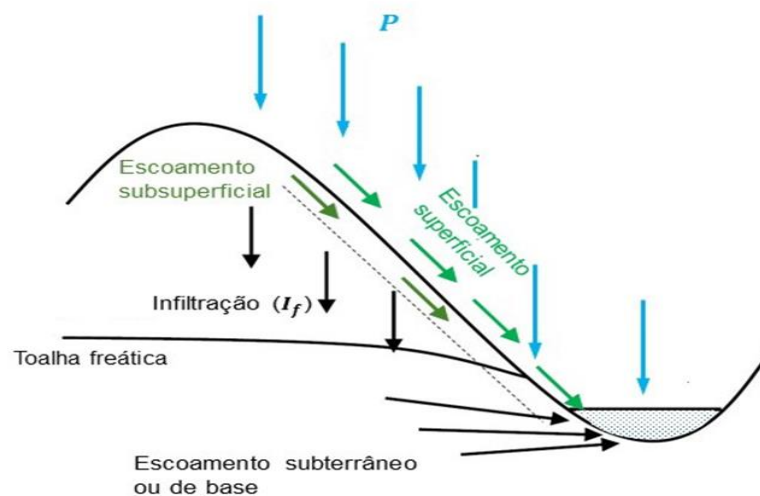


**Figura 2.9: Relação entre a evapotranspiração anual e a precipitação anual para diferentes tipos de vegetação**

(Adaptado de Zhang *et al.*, 2001).

Embora os tenham precedido, estes resultados de estudos em bacias são totalmente consistentes com os pressupostos teóricos e resultados experimentais sobre os processos evaporativos (intercepção e transpiração, ver secção 2.3.2).

Os resultados anteriores dão informação sobre a influência da vegetação no escoamento total anual de uma bacia. Em certos casos, porém, é necessária informação adicional sobre os efeitos no regime do escoamento, i.e., na forma como esse escoamento se distribui no tempo. De facto, as respostas do escoamento à precipitação podem processar-se segundo vários mecanismos (processos de escoamento) de forma imediata ou desfasada no tempo (Fig. 2.10).



**Figura 2.10: Processos de escoamento**

**O escoamento superficial e subsuperficial constituem as principais componentes rápidas da resposta à precipitação. O escoamento subterrâneo constitui a principal componente lenta** (Adaptado de David *et al.*, 2011).

A distribuição no tempo do escoamento numa bacia hidrográfica não é constante e varia normalmente em intervalos relativamente curtos (Lee, 1980; Hewlett, 1982). As componentes do escoamento podem ser, no essencial, classificadas como rápidas ou lentas (Lee, 1980; Hewlett, 1982). O escoamento superficial de saturação (localizado em zonas, dinâmicas, de solo saturado envolvendo a linha de água), o escoamento superficial extensivo e/ou o escoamento subsuperficial contribuem são os processos que podem contribuir para a resposta rápida das bacias à precipitação e estão relacionados com a ocorrência de caudais máximos associados às cheias (Ward e Robinson, 2000). A componente lenta do escoamento é alimentada sobretudo pelo



escoamento subterrâneo (originado no subsolo, em aquíferos e toalhas freáticas) e é responsável pela manutenção dos caudais mínimos, nos períodos de ausência de precipitação (Ward e Robinson, 2000).

Em cursos de água permanentes, a contribuição do escoamento rápido é intermitente ao passo que a contribuição do escoamento de base é contínua (Lee, 1980).

A existência de uma densa rede de raízes a matéria orgânica acumulada sobre os solos florestais promove a infiltração da água da chuva no solo (Jewitt, 2005; Ellison *et al.*, 2012). Adicionalmente, contribui também para o aumento da infiltração e diminuição da erosão hídrica (Jewitt, 2005). No entanto, os potenciais benefícios hidrológicos das florestas no favorecimento da infiltração e recarga de aquíferos são contrariados pelo aumento da evapotranspiração (Bosch e Hewlett, 1982; Calder, 1998; Zhang *et al.*, 2001; Robinson *et al.*, 2003; Calder *et al.*, 2004; Farley *et al.*, 2005; Jackson *et al.*, 2005). Tradicionalmente, pensava-se que as florestas regularizavam o regime de escoamento (i.e., diminuía as pontas de cheia e aumentavam os escoamentos mínimos estivais) (Andréassian, 2004; Jewitt, 2005). Esta inferência decorria do modelo interpretativo de formação do escoamento de Horton (teoria da infiltração), segundo o qual existiam só dois tipos de escoamento (o superficial extensivo (componente rápida – cheias) e o escoamento subterrâneo (componente lenta – caudais mínimos)) e só era conhecida a influência das florestas no aumento da capacidade de infiltração do solo.

Hoje sabe-se que, por um lado, a dinâmica dos processos de escoamento é mais complexa do que a inicialmente referida por Horton e, por outro, que a evapotranspiração é maior em florestas do que noutros tipos de vegetação (Zhang *et al.*, 2001; Jackson *et al.*, 2005). Assim, e em relação à recarga de água em profundidade, as florestas promovem maior infiltração (vetor de entrada) mas também originam maiores perdas de água por evapotranspiração (vetor de saída). Normalmente, o aumento relativo da evapotranspiração em florestas é maior do que o da infiltração (Jewitt, 2005), traduzindo-se tendencialmente numa diminuição da recarga de aquíferos e das componentes lentas do escoamento (o que é diferente do inicialmente suposto) (Robinson *et al.*, 2003; Andréassian, 2004; Farley *et al.*, 2005; Jackson *et al.*, 2005).

Quanto às cheias, tem-se verificado que, de facto, as florestas tendem a reduzir os caudais de ponta de cheia (confirmando a inferência clássica). No entanto, o efeito das florestas na diminuição dos caudais de máxima cheia é mais significativo em cheias de pequena-média magnitude. O efeito das florestas na redução das grandes cheias (quando o volume de precipitação é muito elevado num curto espaço de tempo) é normalmente residual (Hewlett, 1982; Andréassian, 2004; Jewitt, 2005).

## 2.2.5 O caso particular das plantações de *Eucalyptus globulus*

A área ocupada por plantações de eucaliptos tem aumentado nas últimas décadas, ocupando presentemente mais de 20 milhões de hectares em todo o planeta. Mais de 90% desta área corresponde a povoamentos de *Eucalyptus globulus*, *E. camaldulensis*, *E. grandis*, *E. tereticornis*, *E. nitens*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E. dunnii*, *E. pellita* e os seus híbridos (Booth, 2013). Em Portugal, a área ocupada por *E. globulus* aumentou 30% nos últimos 20 anos, representando cerca de 23% de toda a área florestal do país, ou seja, aproximadamente 740000 ha (ICNF, 2013).

### 2.2.5.1 Resultados de Pares Bacias - Escoamento total anual

O estudo experimental mais completo realizado até à data sobre o impacto de plantações de *Eucalyptus globulus* no volume total anual de escoamento (produção de água) foi realizado no sul da Índia, recorrendo ao método dos pares de bacias (Samraj *et al.*, 1988; Sharda *et al.*, 1998).

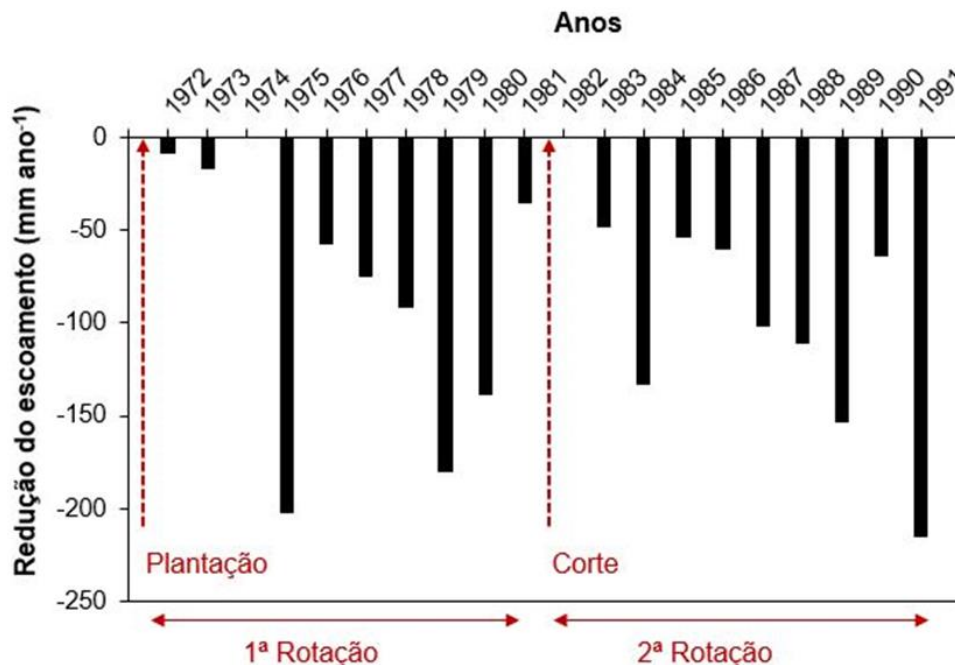
O estudo teve por base duas bacias hidrográficas adjacentes, cada com uma área aproximada de 32 ha e com características fisiográficas semelhantes. A precipitação média anual na região é de aproximadamente 1380 mm. Antes do início do estudo as duas bacias estavam cobertas por pastagens naturais. Essa vegetação foi mantida durante 4 anos, no período de calibração. Seguidamente, uma das bacias foi florestada com *E. globulus*.

A monitorização do impacto hidrológico da plantação de eucalipto prolongou-se por duas rotações, desde a plantação inicial até ao primeiro corte (primeira rotação) e por mais dez anos a seguir ao corte (segunda rotação). A redução no escoamento anual induzida pela plantação, relativamente ao período pré-plantação (pastagem), está representada na Figura 2.11.

Verificou-se que durante os primeiros 3 anos após a plantação a redução de Q foi negligenciável, mas, após o 4º ano, as reduções no escoamento total anual foram significativas, decorrentes do aumento na ET. Em média, durante a primeira rotação, a plantação de eucalipto induziu uma redução de aproximadamente 16% no escoamento total anual relativamente à pastagem inicial.

Imediatamente após o corte (1982), o escoamento recuperou para valores de pré-plantação. No entanto, nova redução no escoamento foi observada a partir do segundo ano após corte. A curta duração do efeito do corte (aumento do escoamento em 1982 –

1 ano) deveu-se à rápida regeneração do coberto arbóreo dado que o sistema radicular das árvores se mantém viável apesar do corte. Em média, durante a segunda rotação, a redução do escoamento anual foi de 25.4%, em relação ao escoamento da pastagem inicial.



**Figura 2.11: Redução no escoamento total causado pela plantação de *Eucalyptus globulus* e, após o corte, pelo crescimento da talhadia (segunda rotação)**

(Adaptado de Sharda *et al.*, 1998).

Reduções no escoamento anual de ordem de grandeza semelhante (8 a 36,5%), são reportadas por Silveira e Alonso (2009) após plantações de *E. globulus*, e outras espécies dos géneros *Pinus* e *Eucalyptus*, em 30% da área de uma grande bacia hidrográfica (2097 km<sup>2</sup>) no Uruguai, com precipitação idêntica à observada no estudo da Índia (Sanraj *et al.*, 1988; Sharda *et al.*, 1998; Sikka *et al.*, 2003).

Estudos realizados em bacias de *E. globulus* na Península Ibérica, Almeida e Riekerk (1990) - Portugal/Alentejo, David *et al.* (1994) - Portugal/Estremadura e Fernández *et al.* (2006) - Espanha/Galiza, verificaram também o efeito de curta duração (1-2 anos) de cortes rasos dos povoamentos na recuperação (aumentos temporários) do escoamento em bacias florestadas com *E. globulus*. A seguir a este curto período, o escoamento volta a diminuir rapidamente, devido ao aumento da ET da talhadia em crescimento. Um padrão de comportamento semelhante foi observado a seguir à ocorrência de um fogo florestal num povoamento de *E. globulus* na Galiza (Gras *et al.*, 1993).

Os efeitos das plantações de *E. globulus* na redução do escoamento anual são mais pronunciados nos anos húmidos. Nos anos secos, a água da precipitação é

praticamente toda consumida pela ET, sendo o escoamento anual nulo ou muito reduzido (David *et al.*, 1994; Lee, 1980; Hewlett, 1982; Silveira e Alonso, 2009). Estes resultados estão de acordo com a análise global de Zhang *et al.* (2001) que mostra que a precipitação é totalmente (ou quase) utilizada na evapotranspiração para precipitações anuais inferiores a 700 mm, independentemente do tipo de coberto vegetal (Fig. 2.9).

#### **2.2.5.2 Resultados de Pares Bacias - Caudais de ponta de cheia e caudais mínimos**

No referido estudo de pares de bacias do sul da Índia, foram observadas significativas reduções, quer nos caudais máximos, quer nos caudais mínimos do mês mais seco, após plantações de *E. globulus* (1ª e 2ª rotações) (Fig. 13 em Sikka *et al.*, 2003).

Rodríguez-Suárez *et al.* (2011), na Galiza, verificaram também um efeito de redução no nível freático e nos caudais mínimos dos meses mais secos, 3-4 anos após a instalação de plantações de *E. globulus*. Ainda na Galiza, Soto *et al.* (2007) observaram numa bacia florestada com *E. globulus*, uma tendência crescente de redução dos caudais mínimos dos meses mais secos e, 7 anos após a plantação, uma diminuição do escoamento total de aproximadamente 30% em relação à situação inicial. Na Austrália, os resultados da monitorização dos níveis freáticos em 80 bacias com plantações florestais (principalmente de *E. globulus*) sugerem uma ligação entre a área ocupada pelas plantações e o aumento da profundidade da toalha freática (George *et al.*, 1999). O abaixamento do nível freático e a redução das componentes lentas do escoamento em bacias australianas florestadas com *E. globulus* foi também reportado por Mauger *et al.* (2001).

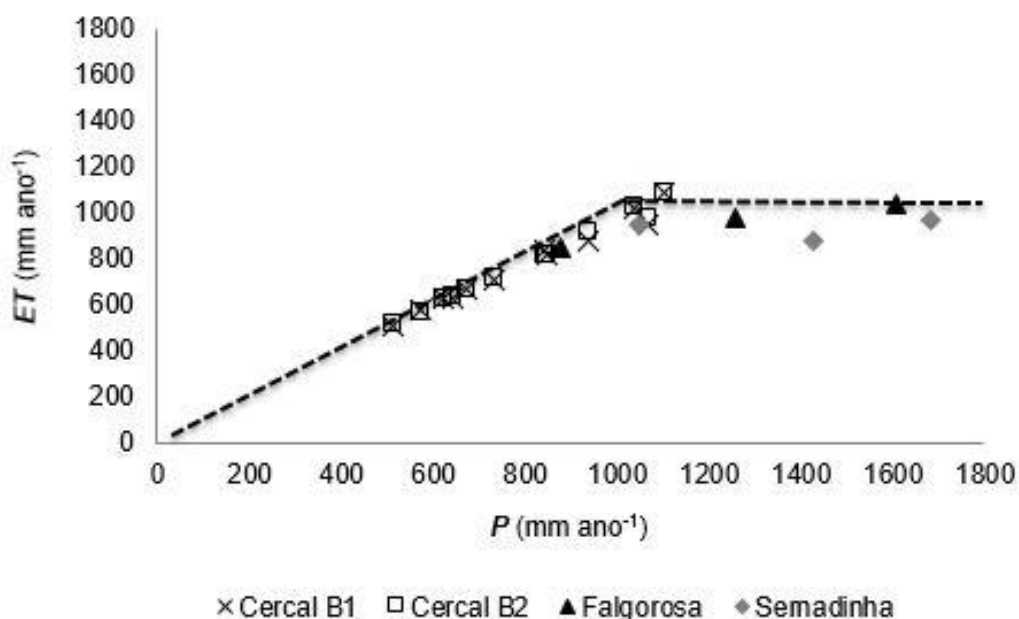
Os efeitos, quer da plantação, quer de cortes de povoamentos de *E. globulus* nas componentes do escoamento, devem-se essencialmente a variações na evapotranspiração. No caso dos cortes, o efeito de compactação do solo durante o processo de corte e extracção da madeira, pode diminuir a capacidade de infiltração do solo (David *et al.*, 1994)

#### **2.2.5.3 Evapotranspiração - Balanço de Bacias (ET)**

A evapotranspiração anual (ET) em bacias hidrográficas pode ser calculada pela equação do balanço hidrológico anual (Equação 2.2), assumindo nula a variação anual

do armazenamento. Este método calcula a  $ET$  total, não discriminando entre as suas componentes (Transpiração ( $T$ ) e a perda por Intercepção ( $I$ )).

A  $ET$  anual de povoamentos adultos de *Eucalyptus globulus*, calculada para bacias do Norte (Ferreira, (2001), Falgorosa e Sernadinha) e centro (David *et al.* (1994), Cercal 1 e Cercal 2) de Portugal, está representada na Figura 2.12 em função da precipitação anual ( $P$ ).



**Figura 2.12: Relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração anual em quatro bacias com povoamentos adultos de *Eucalyptus globulus* em Portugal ( $n=30$ )**

(Adaptado de David *et al.*, 1994 e Ferreira, 2001).

Para  $P < 1000$  mm anuais, a relação entre  $ET$  e  $P$  é linear com um declive próximo de 1 (Fig. 2.12). Isto sugere que, nestas condições a totalidade (ou grande parte) da água da precipitação é evapotranspirada e o escoamento anual nulo ou muito reduzido.

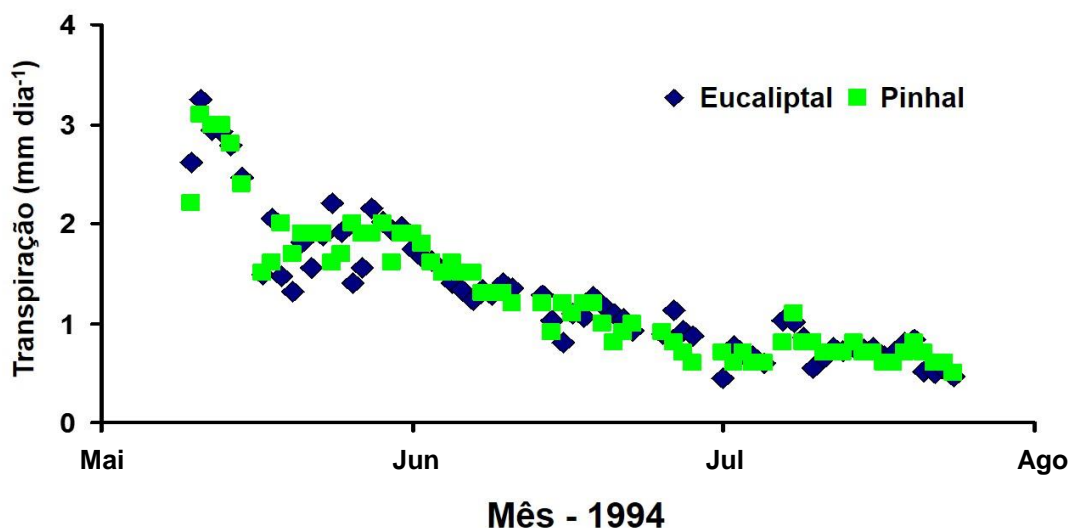
Para  $P > 1000$  mm ano<sup>-1</sup>, a  $ET$  estabiliza (em aproximadamente 1000 mm ano<sup>-1</sup>) para todos os locais, deixando de depender da precipitação. Este valor (1000 mm ano<sup>-1</sup>) corresponde aproximadamente à evaporação de água livre<sup>2</sup> nas regiões estudadas. Quando  $P > 1000$  mm, a precipitação adicional à  $ET$  ( $= P - 1000$ ) gera escoamento. Benyon *et al.* (2006) referem também uma evapotranspiração anual média para plantações de *E. globulus* na Austrália de aproximadamente 1000 mm ano<sup>-1</sup>.

A relação da Figura 2.12 é consistente com as “curvas de Zhang” (Fig. 2.9): uma relação aproximadamente linear entre  $P$  e  $Q$  para baixos valores de  $P$  e um patamar de estabilização para valores de  $P$  mais altos.

<sup>2</sup> A partir de tinas de evaporação.

### 2.2.5.3.1 Transpiração (T)

A transpiração em plantações florestais em Portugal (*E. globulus* e *Pinus pinaster*) foi avaliada em dois estudos simultâneos durante a Primavera-Verão de 1994 (Loustau *et al.*, 1996; David *et al.*, 1997), pelo método de medição do fluxo de seiva de Granier (Granier, 1985). Os dois povoamentos estavam próximos e tinham índices de área foliar semelhantes (Lezírias e Pegões; 2,7 e 3,2, para *P. pinaster* e *E. globulus*, respectivamente). Os padrões de variação e valores absolutos da transpiração durante o período estudado foram muito semelhantes nos dois casos (Fig. 2.13).



**Figura 2.13: Uso da água por *E. globulus* e *Pinus pinaster* em Portugal**

(Adaptado de Loustau *et al.*, 1996 e David *et al.*, 1997).

Num estudo realizado em 6 plantações de *E. globulus* na Austrália, com idades entre os 2 e os 8 anos, Forrester *et al.* (2010) verificaram a existência de uma relação linear entre o índice de área foliar e a transpiração. A transpiração (fluxo de seiva no tronco medido pelo método do *heat-pulse* (Olbrich, 1991) aumentou com a idade dos povoamentos, em função da variação do índice de área foliar, atingindo um máximo entre os 4 e os 6 anos. Este resultado é consistente com os resultados ao nível de bacias hidrográficas, obtidos por Sharda *et al.* (1998) em plantações de *E. globulus* no sul da Índia, onde as maiores reduções no escoamento na primeira rotação se verificam a partir dos 4 anos de idade (coincidindo com o fecho do coberto) (ver Figura 2.11).

No SW da Austrália, em condições de clima de tipo mediterrânico e com 1040 mm de precipitação anual, Drake *et al.* (2012) mediram a transpiração usando o método do “heat ratio” (Burgess *et al.*, 2001a; Burgess *et al.*, 2001b), em povoamentos de *E. globulus* após plantação e após regeneração das toijas. A transpiração anual foi estimada em 1341 mm ano<sup>-1</sup> (3 anos após corte - regeneração) e 869 mm ano<sup>-1</sup> 3 anos após plantação. Estes valores são curiosamente próximos dos 1000 mm ano<sup>-1</sup>, referidos em 2.2.5.3, e maiores 3 anos após o corte do que 3 anos após a plantação, o que é consistente com os dados obtidos em bacias (ver Figura 2.11).

Nas montanhas de Etiópia, com cerca de 1500 mm de precipitação anual, Fritzsche *et al.* (2006) registaram pelo fluxo de seiva (método *Granier*) numa plantação de *Eucalyptus globulus* taxas máximas de transpiração da copa durante a estação seca de 3,21 mm dia<sup>-1</sup>, valores semelhantes aos máximos observados em Portugal - Pegões (ver Figura 2.13).

#### **2.2.5.3.2 Perdas por intercepção (*I*)**

A perda por intercepção, *I*, foi medida nas duas plantações do Ribatejo (*P. pinaster* e *E. globulus*) referidas no ponto anterior durante cerca de 2 anos e meio (Valente *et al.*, 1997). Os resultados (Quadro 2.1) mostram que as perdas por intercepção (evaporação da água intercetada) são ligeiramente superiores no pinhal comparativamente ao eucaliptal, aproximadamente 11% da precipitação bruta neste último caso (Valente *et al.*, 1997). A diferença deve-se à reconhecida maior capacidade de armazenamento das copas de coníferas relativamente às copas das folhosas (David *et al.*, 2005). Valores semelhantes de perdas por intercepção foram obtidos no Chile para povoamentos de *E. globulus* com 9 anos (*I*=10-11% de *P*) e *Pinus radiata* com 23 anos (*I*=16-17% de *P*) (Huber *et al.*, 2010). Outras observações em povoamentos adultos de *E. globulus* referem valores de 13,4% e 18% da precipitação bruta para a Galiza (Rodríguez-Suárez *et al.*, 2014) e a Austrália (Benyon *et al.*, 2006), respectivamente.

À semelhança do verificado para a transpiração, as perdas por intercepção em plantações de *E. globulus* tendem a aumentar com a idade, i.e. com o aumento do índice de área foliar (Forrester *et al.*, 2010; Rodríguez-Suárez *et al.*, 2014).

**Quadro 2.1: Valores acumulados de precipitação bruta para o período entre Janeiro de 1992 e Julho de 1994.**

(Adaptado de Valente *et al.* 1997).

Plantação	Precipitação bruta	Perdas por interceção	
	Mm	mm	% Precipitação bruta
<i>Pinus pinaster</i>	1366.2	233.7	17.1
<i>Eucalyptus globulus</i>	1545.8	166.8	10.8

### 2.2.6 Comentários finais

No geral os resultados mostram que os povoamentos de *E. globulus* têm um efeito expectável nos recursos hídricos, compatível com o usual em plantações florestais intensivas de elevada densidade: elevada  $ET$  e consequentes reduções em  $Q$ . Estes resultados serão, em teoria, um pouco independentes da espécie. De facto, a Fig. 2.13 mostra que as transpirações de *E. globulus* e *P. Pinaster* são muito idênticas para valores semelhantes de índice de área foliar.

É importante recordar aqui que o consumo de água pela transpiração é o “custo” de água para a fotossíntese (*trade-off* carbono-água) (ver 2.2.3). São os valores relativamente altos de  $T$  que permitem as elevadas produções de biomassa e sequestro de carbono nas plantações de *E. globulus* (Pereira *et al.*, 2007).



### 3. Metodologia de Investigação

#### 3.1 A Metodologia *Water Footprint Network* – O conceito de Pegada Hídrica

O reconhecimento internacional da água enquanto recurso limitado, escasso e com elevado valor económico, ocorreu no ano de 1992, na Conferência sobre a “Água e Meio Ambiente” em Dublin. Tendo então passado a ser considerada um bem económico, a água passou a integrar um mercado dependente das condições de oferta e procura, condições essas que têm a particularidade de poderem ser reguladas pelos preços. Nesse contexto, as transferências de bens entre países ganharam uma nova dimensão destinada a manter a sustentabilidade dos recursos hídricos de cada país a longo prazo (Allan, 2003).

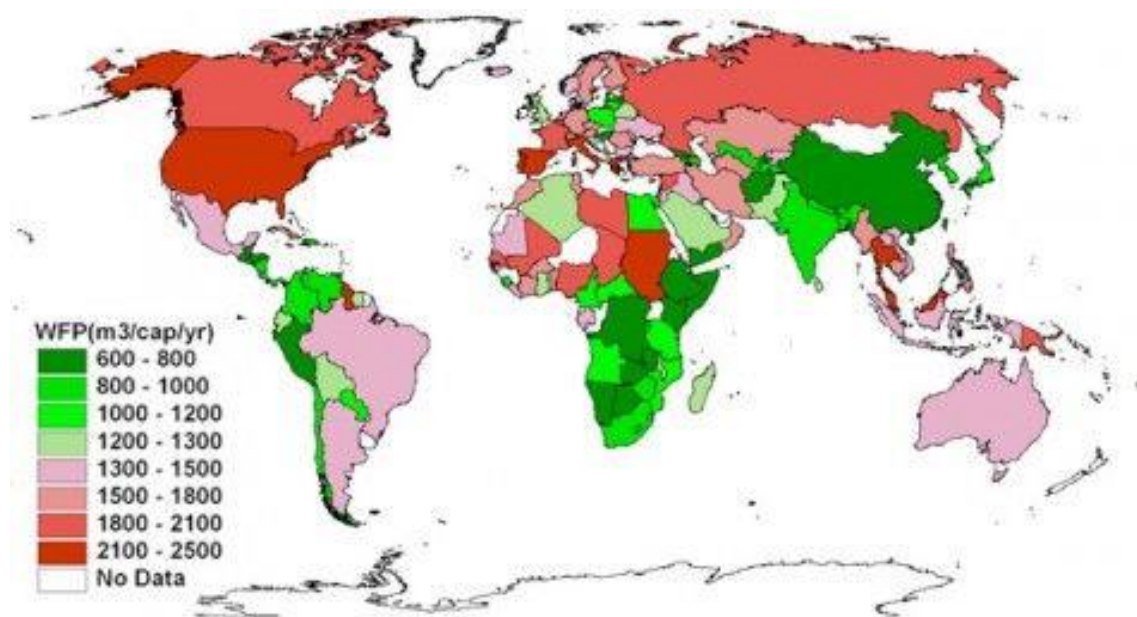
A abordagem da água virtual (Allan, 1998, 2003) surgiu, assim, com o objectivo de dimensionar de uma forma económica as relações entre países, focando o comércio indirecto de água que está incorporada em determinados produtos, especialmente nas *commodities* agrícolas.

O grupo liderado por A. Y. Hoekstra da Universidade de Twente, na Holanda, e a UNESCO – IHE (Institute for Water Education) tornou o conceito mais conhecido e operacional ao realizarem um trabalho de identificação e quantificação dos fluxos de comércio de água virtual entre países (Hoekstra e Hung, 2002). Hoekstra (2003) defende que a água virtual se refere à quantidade de água exigida por um bem ao nível da sua produção, tendo em consideração o lugar onde este será consumido. Assim, a água virtual permite relacionar água, alimentos e comércio internacional, tendo sido estimado que o comércio global movimenta um volume anual de água virtual na ordem dos 1000 km<sup>3</sup> a 1340 km<sup>3</sup> (Hoekstra e Hung, 2002).

Em 2002 foi introduzido o conceito de pegada hídrica por Hoekstra e Hung, um indicador relativo ao consumo de água, com a principal função de contabilizar a quantidade de água utilizada nos bens e serviços que são consumidos pelos habitantes de um país. Este conceito inclui informação baseada no conceito de água virtual e pretende quantificar a quantidade real de água necessária para sustentar e satisfazer a sociedade (Hoekstra *et al.*, 2011). Após a introdução do conceito de “pegada hídrica” ou “pegada de água” a ideia de considerar o uso da água ao longo das cadeias de abastecimento/produção, nacionais e internacionais, ganhou dimensão, captando a atenção de membros da academia, do sector productivo, de organizações de defesa do ambiente e do público.

Desde então, os investigadores da Universidade de Twente têm desenvolvido esforços para estimar a pegada hídrica de diferentes países e produtos e ao nível global (Hoekstra

e Chapagain, 2007; 2008; Hoekstra e Mekonnen, 2012; van Oel e Hoekstra, 2010). A média global da pegada hídrica é de aproximadamente 1385m<sup>3</sup>/ano per capita (waterfootprint.org) variando substancialmente este valor de país para país (Hoekstra e Chapagain, 2008). A figura 3.1 ilustra a estimativa da pegada hídrica *per capita* dos diferentes países, permitindo ter uma visão global da distribuição desta pegada no mundo. Os países com coloração verde têm uma pegada hídrica média nacional inferior à média global, enquanto que os países a vermelho, como é o caso de Portugal, são classificados como importadores líquidos de água, com pegadas hídricas médias nacionais superiores à média global estimada.

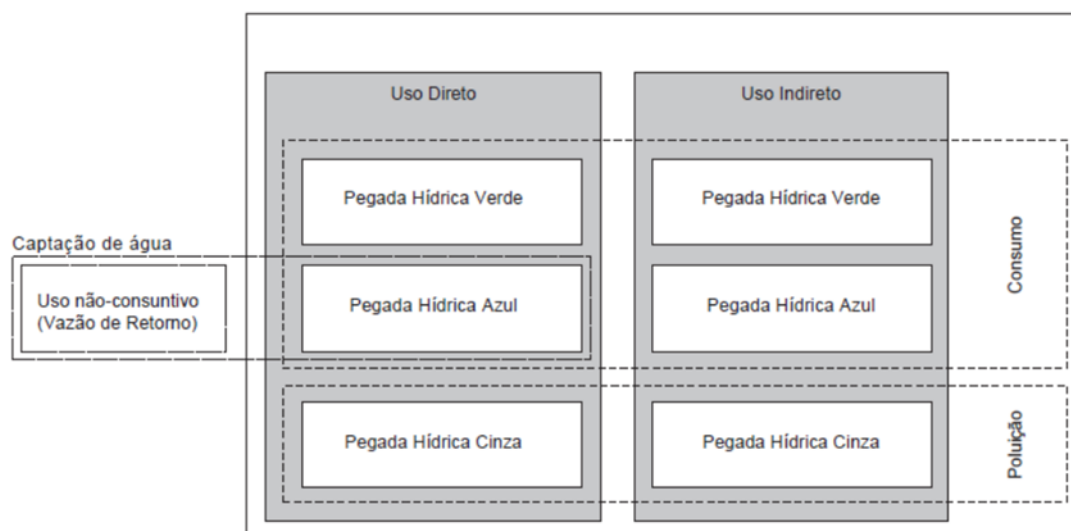


**Figura 3.1: Pegada hídrica dos diversos países (m<sup>3</sup>/hab/ano)**

(Adaptado de Hoekstra e Chapagain, 2008)

## **Tipos de Pegada**

Para compreender melhor a análise crítica apresentada ao cálculo da “pegada hídrica verde” ou “água verde” (ver ponto 3.1.4), considerou-se essencial descrever sumariamente os diferentes conceitos e componentes existentes utilizados na metodologia do *Water Footprint Network*, tal como ilustrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2: Esquema ilustrativo das componentes da pegada hídrica**

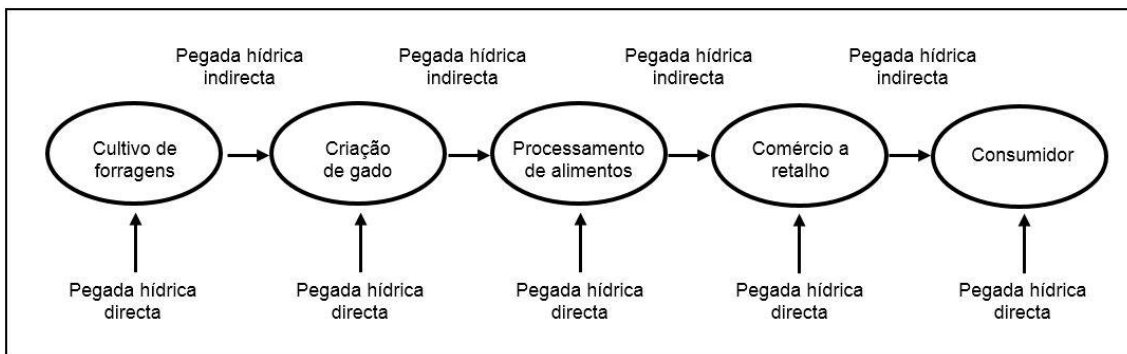
(Fonte: Hoekstra *et al.*, 2011)

### 3.1.1 Pegada hídrica directa e indirecta

A pegada hídrica pode ser classificada como directa, quando diz respeito ao consumo e poluição de água relacionados com as actividades domésticas de um consumidor ou de uma empresa, como por exemplo, o uso de água em casa ou no jardim ou na operacionalização de uma fábrica. Quando se refere ao consumo ou poluição associados à produção de bens e serviços adquiridos e posteriormente utilizados pelo consumidor ou pela empresa, a pegada hídrica é considerada indirecta (Hoekstra *et al.*, 2011).

No caso de um consumidor individual, a pegada hídrica indirecta é geralmente superior à pegada hídrica directa, que por ser “invisível”, é normalmente negligenciada. Assim, a maior parte da pegada hídrica de um consumidor corresponde à sua pegada hídrica indirecta, ou seja, está associada aos produtos que consome e não tanto à água despendida nas suas actividades domésticas, tal como ilustrado na Figura 3.3 para um produto de origem animal.

Em relação às empresas, a grande maioria tem igualmente o grosso da sua pegada hídrica alocado à cadeia de abastecimento (pegada hídrica indirecta) e não à etapa de operacionalização (pegada hídrica directa), sendo que medidas aplicadas na cadeia de abastecimento são por isso consideradas como custo-eficazes.



**Figura 3.3: Pegada hídrica directa e indirecta em cada estágio da cadeia de suprimento de um produto de origem animal**  
(Adaptado de Hoekstra *et al.*, 2011)

### 3.1.2 Pegada hídrica interna e externa

A pegada hídrica interna refere-se à utilização dos recursos hídricos do país para produzir os bens e serviços consumidos pelos seus habitantes. A pegada hídrica externa diz respeito à quantidade de recursos hídricos utilizados fora do país, necessários para a produção de bens e serviços consumidos por estes habitantes, através da importação (Hoekstra *et al.*, 2011).

Ao ser realizada uma análise da pegada hídrica externa, é possível compreender as características do consumo nacional, analisando assim a dependência do país face aos recursos hídricos externos.

### 3.1.3 Pegada hídrica azul

A pegada hídrica azul é um indicador de uso consumptivo de água doce superficial (rios, lagos, albufeiras) ou subterrânea que está directamente dependente das variáveis que regulam o balanço hidrológico (precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação, entre outras). O termo “consumptivo” refere-se aos quatro casos seguintes:

1. Água evaporada;
2. Água incorporada no produto;
3. Água que não regressa à mesma bacia hidrográfica (regressa a uma outra bacia ou ao mar);
4. Água que regressa num período temporal diferente (deixa a bacia numa época de escassez e retorna num período de elevada precipitação).

A evaporação é geralmente a componente mais significativa, sendo que em alguns casos é considerada o único uso consumptivo. O uso consumptivo de água não implica o seu desaparecimento, dado que toda a água retorna naturalmente ao ciclo hidrológico em escalas temporais mais ou menos longas, podendo posteriormente gerar mais precipitação (ver 2.2.1).

Sendo a água um recurso renovável, o mesmo não significa que a sua disponibilidade seja ilimitada. Num período de tempo definido, a quantidade de água que chega a uma bacia, recarrega as reservas de água subterrâneas e flui através de um rio é sempre limitada a um determinado montante (ver 2.2.2). Assim, a pegada hídrica azul pretende estimar a quantidade de água disponível consumida num determinado período (ou seja, água que não retornou imediatamente à mesma bacia hidrográfica). Desta forma, esta pegada fornece informação relativamente à quantidade de água disponível consumida por seres humanos. A restante parte, não consumida diretamente pelos seres humanos, destina-se à manutenção dos ecossistemas que dependem dos fluxos de água subterrânea e superficial (Hoekstra *et al.*, 2011).

A pegada hídrica azul, num processo, é calculada tendo em conta três factores:

$$Pegada\ hídrica\ azul\ (PA_{proc,azul}) = \begin{matrix} \text{Água\ azul} \\ \text{evaporada} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Água\ azul} \\ \text{incorporada} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Perda\ no\ fluxo} \\ \text{de\ retorno} \end{matrix}$$

Atendendo a que a unidade da pegada hídrica azul é o volume de água por unidade de tempo, ao fazer-se a divisão pela quantidade de produto que resulta do processo, esta também pode ser expressa em termos de volume de água por unidade de produto.

Na avaliação da pegada hídrica azul de um processo, dependendo do âmbito de estudo, pode ser relevante distinguir as diferentes fontes de água. A divisão mais importante é entre a água superficial, a água subterrânea renovável e a água subterrânea fóssil. No entanto, esta distinção não é feita com frequência dada a insuficiência de dados disponíveis (Hoekstra *et al.*, 2011). Segundo o autor o maior utilizador deste tipo de água é o sector agrícola.

### 3.1.4 Pegada hídrica verde

A “água verde” refere-se à precipitação que chega à superfície terrestre e é armazenada no solo ou que permanece temporariamente à superfície ou na vegetação. Isto é, água que não gera escoamento superficial ou infiltração. Eventualmente, esta fracção da

precipitação evapora-se ou é utilizada pelas plantas, tornando-se produtiva. Assim, a pegada hídrica verde é o volume de água da chuva consumida durante o processo de produção. Este parâmetro é particularmente relevante para os produtos provenientes da agricultura e silvicultura, referindo-se ao total acumulado da precipitação evapotranspirada pelas culturas e campos de cultivo e da água da chuva incorporada nos produtos. A pegada hídrica verde num processo é expressa em volume de água por unidade de tempo e obtém-se da seguinte forma:

$$Pegada\ hídrica\ verde\ (PA_{proc,verde}) = \frac{Água\ verde\ evaporada}{Água\ verde\ incorporada}$$

A distinção entre a pegada hídrica azul e verde é considerada importante pois os impactos hidrológicos, ambientais e sociais, bem como os custos de oportunidade do uso das águas superficiais e subterrâneas para a produção, diferem dos impactos e dos usos de utilização da água da chuva (Hoekstra e Chapagain, 2008).

O consumo de água verde pela agricultura e silvicultura pode ser estimado utilizando um conjunto de fórmulas empíricas ou um modelo apropriado para estimar a evapotranspiração com base em características do clima, solo e cultura.

### 3.1.5 Pegada hídrica cinzenta

A pegada hídrica cinzenta é um indicador do grau de poluição da água doce. É definida como o volume de água doce que é necessário para assimilar a carga de poluentes com base nos actuais padrões de qualidade ambiental da água.

A pegada hídrica cinzenta, é calculada dividindo a carga poluente ( $L$ , expressa em massa por tempo) pela diferença entre o padrão de qualidade da água desse poluente ( $c_{max}$ , expresso em massa por volume) e a sua concentração natural na massa de água receptora ( $c_{nat}$ , expressa em massa por volume) (Hoeskra *et al.*, 2011). Assim:

$$Pegada\ hídrica\ cinzenta\ (PA_{proc,cinzenta}) = L / (c_{max} - c_{nat})$$

A concentração natural num corpo receptor é a concentração na massa de água que ocorreria se não houvesse perturbações humanas na captação. Para as substâncias de

origem humana, que em condições naturais não estariam presentes na água, ou quando as concentrações naturais não são conhecidas mas em que se assume serem baixas, admite-se que a concentração natural na massa de água receptora é nula ( $c_{nat} = 0$ ).

A razão porque se utiliza a concentração natural como referência e não a concentração real deve-se ao facto de a pegada hídrica cinzenta ser um indicador da capacidade de assimilação apropriada. A capacidade de assimilação de um corpo receptor depende da diferença entre o máximo admissível e a concentração natural de uma substância.

Os cálculos da pegada hídrica cinzenta são realizados utilizando as normas de qualidade ambiental da água para a massa receptora, ou seja, normas que têm em conta as concentrações máximas admissíveis.

De realçar que para a mesma substância, o padrão de qualidade ambiental da água pode variar de acordo com a massa de água em questão tal como a concentração natural pode variar tendo em conta a localização. Assim, uma carga poluente pode resultar numa determinada pegada hídrica cinzenta, com maior ou menor impacto, determinada pela diferença entre a concentração máxima permitida e a concentração natural do local em causa (Hoekstra *et al.*, 2011).

No caso específico das fábricas que, após tratamento, devolvem ao meio receptor os efluentes, a metodologia estabelece que o somatório da pegada hídrica cinzenta é nulo.

### **3.1.6 Pegada hídrica de um produto**

A pegada hídrica de um produto é definida como o volume total de água doce utilizada (em todas as fases da cadeia de produção) directa ou indirectamente para o produzir. O procedimento utilizado é semelhante para todos os produtos, quer sejam agrícolas ou industriais. Como descrito nos pontos anteriores, a pegada hídrica de um produto pode também ser discriminada em termos de água azul, verde e cinzenta.

No caso dos produtos agrícolas, a pegada hídrica é geralmente expressa em metros cúbicos por tonelada de produto ou litros por quilograma de produto. Em muitos casos e para certos produtos pode ainda ser expressa em volume de água por tipo de produto, como é o caso dos produtos industriais. Em alternativa, existem outras formas menos comuns de expressar a pegada hídrica de um produto, nomeadamente volume de água por quilo caloria (quando estão em causa produtos alimentares) ou volume de água por joule (energia eléctrica ou combustíveis).

Quando um sistema de produção produz mais do que um produto de saída é necessário efectuar a alocação da pegada de água pelos vários produtos e Hoekstra *et al.* (2009)

recomendam a utilização de um critério de alocação económico, baseado no valor de mercado dos produtos.

Numa tentativa de chamar a atenção para as questões da água e, igualmente, para reforçar a divulgação e aplicação do conceito da pegada hídrica, a partir de 2008 foram publicados vários livros e relatórios destinados a divulgar as estimativas das pegadas hídrica verde e azul (WF) de vários produtos de uso quotidiano (e.g. Hoekstra e Chapagain, 2008; Hoekstra *et al.*, 2009; 2011) e, mais especificamente, dos produtos de papel (van Oel e Hoekstra, 2010; 2012). No quadro 3.1. apresentam-se, a título comparativo, alguns exemplos de produtos para os quais foi estimada a pegada hídrica e o respectivo teor de água virtual. Este relatório, e os resultados nele estimados, atraíram a atenção de vários sectores, do sector produtivo a legisladores, e tem estado na origem de discussão na sociedade civil e na comunidade científica (Cosgrove, 2013; Chenoweth *et al.*, 2014; Launiainen *et al.*, 2014; Perry, 2014; Quinteiro *et al.*, 2017; Wichelns, 2010; 2017).

**Quadro 3.1: Teor médio global de água-virtual de produtos seleccionados, por unidade de produto.**

(Adaptado de Hoekstra e Chapagain, 2008)

<b>Produto</b>	<b>Água-virtual (litros)</b>
<b>1 folha de papel A4 (80g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>10</b>
1 tomate (70 g)	13
1 batata (100 g)	25
1 chávena de chá (250 ml)	35
1 fatia de pão (30 g)	40
1 laranja (100 g)	50
1 maçã (100 g)	70
1 copo de cerveja (250 ml)	75
1 copo de vinho (125 ml)	120
1 ovo (40 g)	135
1 chávena de café (125 ml)	140
1 copo de sumo de laranja (200 ml)	170
1 copo de sumo de maçã (200 ml)	190
1 copo de leite (200 ml)	200
1 hamburguer (150 g)	2,400

O interesse nos resultados incluídos no relatório da WFN estendeu-se igualmente à indústria papelreira internacional, uma vez que as estimativas comunicadas, em termos



de volume de água necessária para produzir uma folha de papel A4, 10 litros por folha (Quadro 3.1) (Hoekstra e Chapagain, 2008; van Oel e Hoekstra, 2010; 2012), foram consideradas elevadas pelo sector (UPM-Kymmene, 2011; Launiainen *et al.*, 2014; Fibria, 2013; 2015) e fizeram questionar o seu impacto nos recursos hídricos globais.

### 3.1.7 Pegada hídrica associada às actividades florestais

A pegada de água total associada ao processo de crescimento das árvores ( $PA_{proc}$ ) é o somatório das componentes verde, azul e cinzenta:

$$PA_{proc} = PA_{proc,verde} + PA_{proc,azul} + PA_{proc,cinzenta}$$

A componente verde ( $PA_{proc,verde}$ ,  $m^3 \text{ ton}^{-1}$ ) é calculada a partir do quociente entre a componente verde do uso da água pelas árvores ( $UA_{verde}$ ,  $m^3 \text{ ha}^{-1}$ ), e a produtividade ( $Y$ ,  $\text{ton ha}^{-1}$ ).

$$PA_{proc,verde} = \frac{UA_{verde}}{Y} \quad (3.1)$$

A Componente azul ( $PA_{proc,azul}$ ,  $m^3 \text{ ton}^{-1}$ ) é calculada da mesma forma:

$$PA_{proc,azul} = \frac{UA_{azul}}{Y} \quad (3.2)$$

A componente cinzenta ( $PA_{proc,cinzenta}$ ,  $m^3 \text{ ton}^{-1}$ ) é calculada a partir da taxa de aplicação de químicos por hectare ( $AR$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ), da fracção de lixiviação ( $\alpha$ ), da concentração máxima  $AR$  admissível ( $c_{max}$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ ), da concentração natural do poluente considerado ( $c_{nat}$ ,  $\text{kg m}^{-3}$ ) e da produtividade ( $Y$ ,  $\text{ton ha}^{-1}$ ).

$$PA_{proc,cinzenta} = \frac{(\alpha \times AR) / (c_{max} - c_{nat})}{Y} \quad (3.3)$$

A fracção de lixiviação ( $\alpha$ ) tem em conta o “fluxo de poluentes” que chega efectivamente aos corpos de água doce (superficial ou subterrânea).

A pegada de água cinzenta é determinada para o poluente mais crítico, que é o poluente para o qual a pegada de água é maior.

As componentes verde e azul do uso da água ( $UA$ ,  $m^3 ha^{-1}$ ) são calculadas pela acumulação da evapotranspiração diária ( $ET$ ,  $mm dia^{-1}$ ) ao longo de todo o período de crescimento:

$$UA_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{dpc} ET_{verde}$$

$$UA_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{dpc} ET_{azul}$$

Em que  $ET_{verde}$  e  $ET_{azul}$  representam, respectivamente, a evapotranspiração de água verde e azul. O factor 10 converte altura de água em milímetros em volumes de água por superfície de solo ( $m^3 ha^{-1}$ ). O somatório da evapotranspiração é feito ao longo do período compreendido entre o dia da plantação (dia 1) até ao dia de corte ( $dpc$  representa a duração do período de crescimento em dias). O uso de água verde pelas árvores representa o total de água da chuva evapotranspirada, enquanto que o uso de água azul pelas árvores representa o total de água de irrigação evaporada. A evapotranspiração pode ser medida ou estimada. Dado que a medição da evapotranspiração é cara, regra geral, a evapotranspiração é estimada indirectamente através de modelos que recorrem ao uso dos dados climáticos, propriedades do solo e características dos povoamentos florestais. De entre os vários modelos que existem para estimar a evapotranspiração Hoekstra *et al.* (2009) recomendam o uso do modelo CROPWAT desenvolvido pela FAO (FAO, 2009).

As pegadas de água verde e azul, para além da evapotranspiração, incluem ainda a água incorporada nas árvores. Esta componente é determinada a partir do teor de humidade das árvores. A razão água verde/água azul pode ser considerada igual à razão  $UA_{verde} / UA_{azul}$ . Geralmente, a água incorporada tem pouca representatividade na pegada hídrica total já que a água incorporada é tipicamente cerca de 0,1% da água evapotranspirada (Hoekstra *et al.*, 2009).

Para além do mencionado anteriormente para a evapotranspiração, o cálculo das pegadas verde, azul e cinzenta associadas às actividades florestais também é dificultado pelo facto de requerer um elevado número de dados que ou são inexistentes, ou são difíceis de calcular/estimar ou nem sempre estão disponíveis, podendo afectar fortemente os resultados obtidos.

#### **4. A utilização da água no processo industrial de pasta, papel e cartão**

É reconhecido que o sector português da pasta, papel e do cartão tem interesse estratégico para a fileira florestal e para o País (CELPA 2015), representa uma das mais importantes actividades económicas em Portugal, representando 4,4% do PIB nacional, e 5% do total das exportações portuguesas (CELPA, 2015). As plantações de *Eucalyptus globulus*, ocupam aproximadamente 812 mil hectares (ICNF, 2013), sendo conduzidos maioritariamente como fonte de matéria-prima para a produção de pasta e papel. Efectivamente, a CELPA – Associação da Indústria Papeleira que agrega a maioria dos grupos empresariais do sector em Portugal, têm vindo últimos anos a acompanhar e a trabalhar com entidades internacionais com o intuito de apresentar o perfil de utilização da água na produção de pasta e dos produtos papeleiros (CELPA, 2015).

A importância do sector resulta do uso de matéria-prima nacional, renovável, e da exportação da quase totalidade da sua produção para mais de 140 mercados internacionais, países e regiões administrativas (The Navigator Company, 2015). O sector da pasta, papel e do cartão é, porventura, o maior exportador de Valor Acrescentado Nacional, contribuindo para a redução do deficit da balança comercial do país (CELPA, 2015).

A CELPA - Associação da Indústria Papeleira é constituída por grandes grupos empresariais a operar em Portugal, o grupo Altri, o grupo Europa&C, a *The Navigator Company* e a Renova.

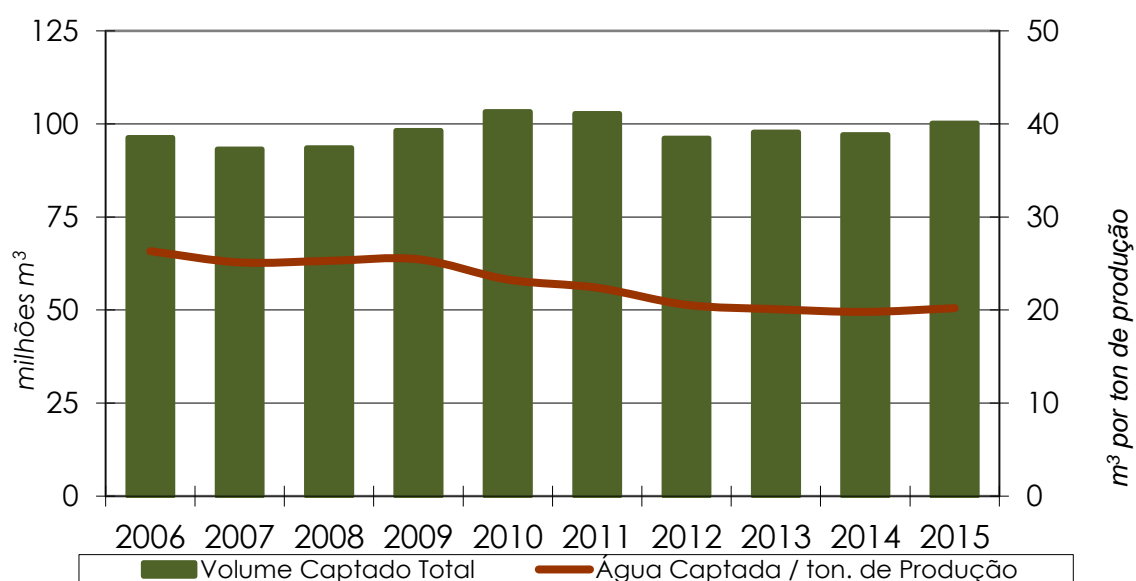
As empresas associadas da CELPA são responsáveis por 100% da produção nacional de pastas para papel e por aproximadamente 90% da produção nacional de papel e cartão (CELPA, 2015). Transformaram, em 2015, 8.4 milhões de m<sup>3</sup> de madeira de eucalipto e gerem cerca de 202 mil hectares de território, na sua esmagadora maioria com gestão florestal certificada (FSC® e PEFC®), procurando maximizar o respeito pelos bens naturais e serviços que lhes estão associados (CELPA, 2015).

O sector português da Pasta, papel e cartão representou em 2015 (CELPA, 2015):

- Mais de 3,3 mil postos de trabalho directo e largas dezenas de milhares de postos de trabalho indirecto;
- A transformação de cerca de 8,4 milhões de m<sup>3</sup> de madeira de eucalipto e de pinheiro-bravo;
- Um volume de negócios superior a 2,2 mil milhões de euros.
- 1,4 % do Valor Acrescentado Bruto nacional;

- 2,4% do total da produção nacional e 8% da produção dos sectores da indústria, energia, água e saneamento.

A utilização de água por tonelada de pasta produzida tem tido um consistente decréscimo ao longo dos últimos anos (Fig. 1.1), reflectindo o programa de investimentos e inovação na optimização do uso deste recurso em cada fase do processo produtivo. Nos últimos 10 anos, cada tonelada de pasta é produzida com menos 6 m<sup>3</sup> de água, o que equivale a uma redução de cerca de 23%.



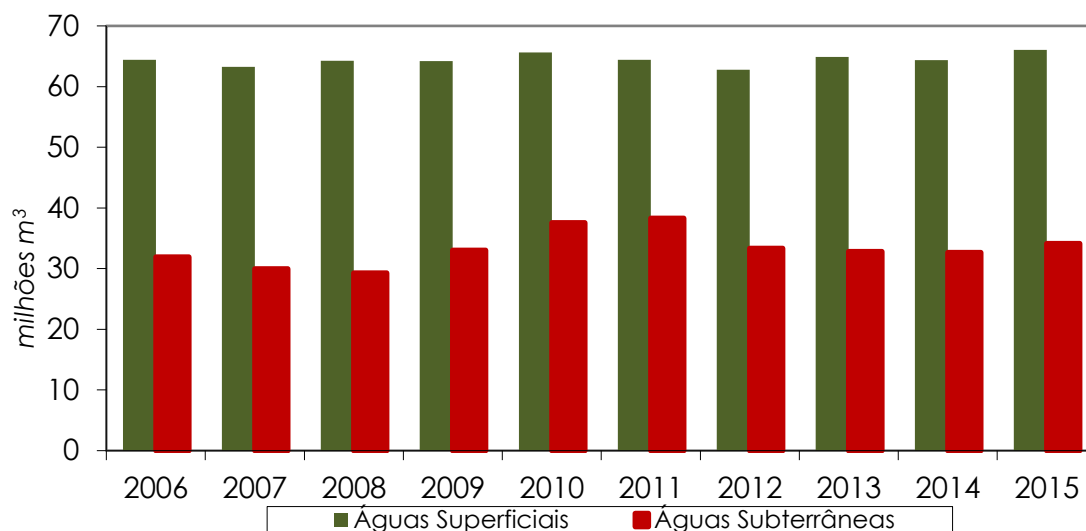
**Figura 4.1: Evolução da utilização da água pela indústria de pasta papel e cartão nos últimos anos**

A água utilizada pelas empresas associadas da CELPA nos diversos processos industriais tem origem em fontes superficiais (rios e albufeiras) e subterrâneas (aquíferos), cumprindo com a legislação em vigor (CELPA, 2015).

À semelhança do registado em anos anteriores, no ano de 2015, 66% da água utilizada teve origem em captações superficiais (Fig. 4.2) (CELPA, 2015).

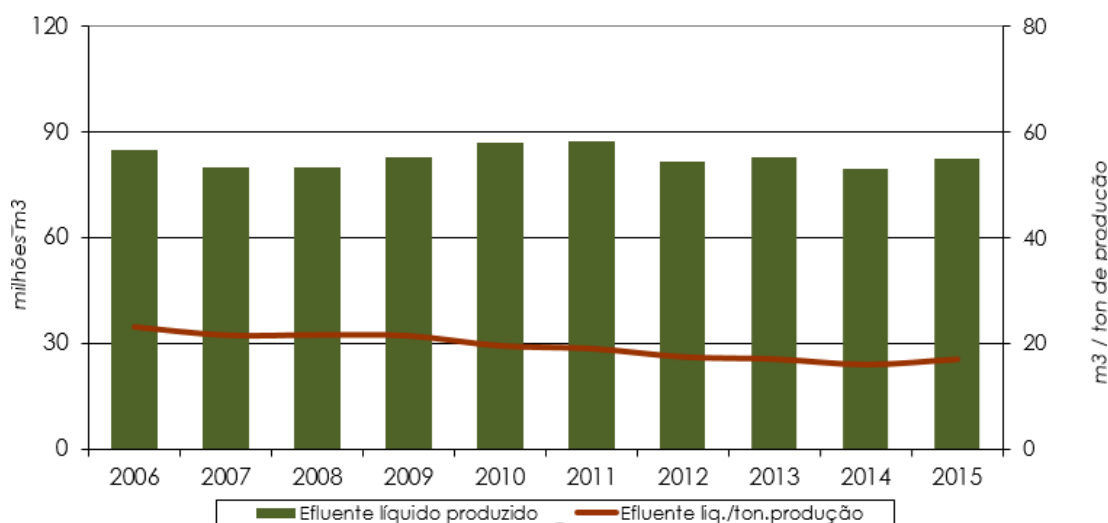
Mais de 85% do total de água utilizada é devolvido nos pontos de descarga dos efluentes (após tratamento), obedecendo aos requisitos de qualidade definidos nas licenças ambientais, sendo o restante libertado para a atmosfera sob a forma de vapor (CELPA, 2015). Todo o efluente líquido produzido é tratado antes de ser libertado no meio receptor: 99,6% do efluente com tratamento primário seguido de um tratamento secundário (tratamento biológico). No período 2014/2015 foram implementadas diversas medidas no âmbito dos projectos de redução da utilização a água nos processos industriais.

Em algumas associadas da CELPA, noamedamente em Cacia e Setúbal, os equipamentos de lavagem foram substituídos por prensas que permitem a redução do líquido de lavagem utilizado no branqueamento, com níveis de eficácia superiores por operarem com alta consistência. Continuou assim a verificar-se a tendência para a estabilização de níveis reduzidos de utilização da água.



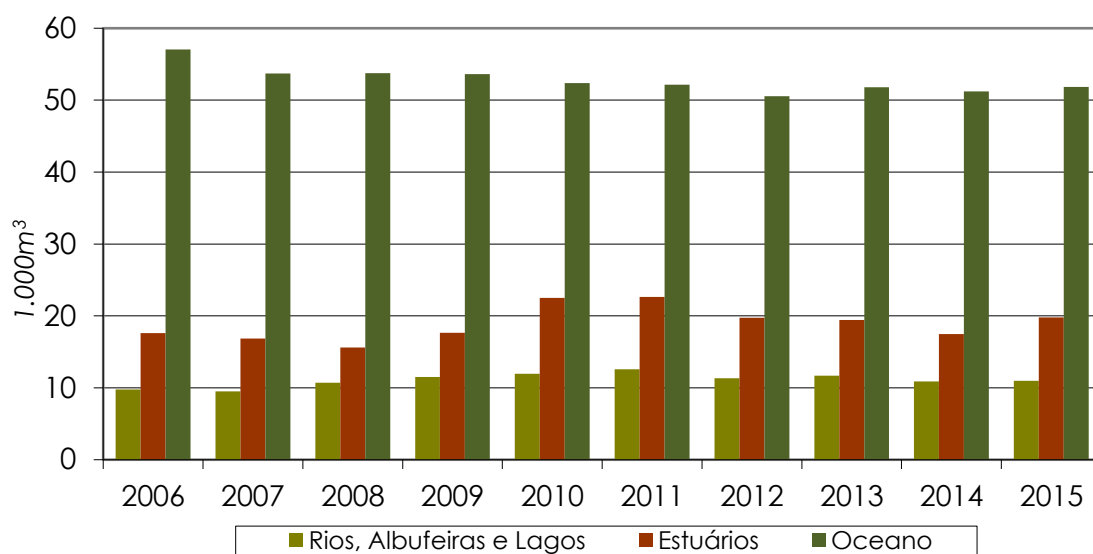
**Figura 4.2: Captação de água total – origem da água.**

A modernização e a adopção das “Melhores Técnicas Disponíveis” (BREF - *Best Available Techniques Reference Document* (Comissão Europeia, 2015)) para o sector, bem como o empenho das empresas associadas da CELPA teve como consequência uma redução muito significativa no volume de efluentes produzidos por tonelada de produção entre 2006 e 2015 (Fig. 4.3).



**Figura 4.3: Rejeição de efluentes líquidos – volume total**

Dado que a maioria dos associados da CELPA se concentra junto à costa e no Vale do Tejo, o destino dos efluentes reflecte essa mesma localização (Fig. 4.4). Em 2015, 63% dos efluentes líquidos foram descarregados no oceano, 24% em estuários e 13% em rios e albufeiras. As descargas realizadas no oceano são efectuadas a uma distância considerável da linha de costa com recurso a emissários submarinos, de modo a reduzir o impacto nos ecossistemas locais.



**Figura 4.4: Rejeição dos efluentes líquidos – destino dos efluentes**

Salienta-se a tendência observada nos últimos anos de melhoria na eficiência da utilização do recurso água (Figuras 4.1 a 4.4).

## 5. Análise crítica do cálculo da componente “água verde” na pegada hídrica do papel

### 5.1 Considerações gerais: análise crítica teórica

O conceito de pegada hídrica pretende traduzir num único parâmetro o nível de impacto nos recursos hídricos que um determinado produto tem numa dada escala espacial como, por exemplo, uma bacia hidrográfica, uma região ou um país (Hoekstra e Chapagain, 2008). No entanto, desde 2002 que o conceito de pegada hídrica tem estado em crescente expansão, suportado pela publicação de numerosos artigos<sup>3</sup> e pela realização de conferências, estabelecendo uma rede de colaborações que ultrapassa em muito a comunidade científica. De facto, esta metodologia recebeu ampla cobertura por parte da imprensa internacional e tem sido bem-sucedida tanto na missão de alertar para as questões relacionadas com o uso da água pela agricultura e indústria, como por constituir uma ferramenta pioneira para avaliar o uso da água (Cosgrove, 2013; Chenoweth *et al.*, 2014). Estas razões levaram a que um número crescente de países, empresas (e.g. Coca-Cola e Nature Conservancy, 2010; Raisio, 2010; Pepsi Co, 2011; Nestlé, 2011; SABMiller *et al.*, 2011; Cooper *et al.*, 2011) e organizações (WWF, 2012) iniciassem acções destinadas a quantificar o uso de água em alguns aspectos das suas operações, aplicando directamente a metodologia da *Water Footprint Network* (Hoekstra e Chapagain, 2008). No entanto, a sua aplicação não é consensual e têm surgido críticas quer ao suporte científico da metodologia quer aos benefícios e âmbito da sua aplicação (Chenoweth *et al.*, 2014; Perry, 2014; Quinteiro *et al.*, 2017; Wichelns 2015; 2017). Por exemplo, tem sido referido que assumir que toda a água consumida ao nível da bacia hidrográfica é uma “apropriação humana” e, conseqüentemente, uma perda, não considera a água doce como um recurso renovável e é inconsistente com os princípios do ciclo hidrológico (Ellison *et al.*, 2012; Gawel e Bernsen, 2013; Launiainen *et al.*, 2013). Por outro lado, potenciais reduções na pegada hídrica global não se traduzem em impactos positivos nas disponibilidades hídricas de regiões com escassez de água ao contrário do verificado, por exemplo, no caso do dióxido e carbono, em que a redução das emissões a nível local gera benefícios a nível global (Ellison *et al.*, 2012; Perry, 2014; Chenoweth *et al.*, 2014; Wichelns, 2017). Outra das críticas à metodologia está relacionada com o facto de apenas quantificar o volume total de água doce (verde, azul e cinzenta) que é utilizada para produzir um bem ou serviço, sem avaliar os

---

<sup>3</sup> A título de exemplo, em Abril de 2018, uma pesquisa de artigos usando as palavras chave “water footprint” na plataforma *Science Direct* devolvia mais de 2000 entradas

potenciais impactos nos recursos hídricos e nos ecossistemas e a sua sustentabilidade (Wichelns, 2010; 2017). Problemas metodológicos, especialmente relevantes na análise da pegada hídrica de um produto com origem na agricultura ou silvicultura, como é o caso do papel, tais como a correcta estimativa da evapotranspiração e a não consideração dos consumos hídricos do “coberto vegetal alternativo”, a dificuldade em separar “água verde” e “água azul” e a frequente inexistência de dados de base disponíveis, aumentam a incerteza associada à aplicação da metodologia (Pffister e Hellweg, 2009; Wichens, 2010; 2015; Berger e Finkbeiner, 2012; Launiainen *et al.*, 2013; Quinteiro *et al.*, 2017). De facto, a aplicação da equação WFN aos produtos de origem florestal, por investigadores da Universidade de Twente, considerando diferentes metodologias para o cálculo da evapotranspiração resulta em valores de pegada hídrica significativamente diferentes (van Oel e Hoekstra, 2012; Schyns *et al.*, 2017).

Num produto de base florestal, a “água verde” assume relevância primordial na quantificação da pegada hídrica ao longo da sua cadeia de produção. Por exemplo, numa folha de papel de impressão e escrita, a componente “água verde” é responsável por mais de 90% da pegada hídrica (UPM-Kymmene, 2011; van Oel e Hoekstra, 2012). Segundo os cálculos, os 10 litros de água atribuídos à produção de uma folha de papel com gramagem 80 g m<sup>-2</sup> estão distribuídos da seguinte forma: 0,06 litros são devidos ao processo industrial e 9,94 litros devem-se à evapotranspiração da floresta (Quadro 3.1) (CEPI, 2012; Fibria, 2015).

Considerando a fórmula geral de cálculo da WFN para a “água verde” (evapotranspiração de culturas agrícolas ou florestais) e considerando a indústria de pasta, papel e cartão -  $WF_{forestry}$  (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>), a Equação 5.1 estima a pegada hídrica do papel (van Oel e Hoekstra, 2012) da seguinte forma:

$$WF_{forestry} [p] = \left( \frac{ET_a + (Y_{wood} \times f_{water})}{Y_{wood}} \right) \cdot f_{paper} \times f_{value} \times (1 - f_{recycling}) \quad (5.1)$$

Em que  $ET_a$  é a evapotranspiração (mm) (ecossistema)  $Y_{wood}$ , a biomassa utilizada no produto (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (madeira cortada),  $f_{water}$  o volume de água por unidade de madeira recém cortada (m<sup>3</sup> água m<sup>-3</sup> madeira cortada),  $f_{paper}$  o factor de conversão de madeira para papel (m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup>),  $f_{value}$  a fração do valor total da floresta que está associada à produção de papel (adimensional) e  $f_{recycling}$  a fração de pasta proveniente de papel reciclado (adimensional). O rendimento da madeira,  $Y_{wood}$ , é estimado supondo que a madeira utilizada para a produção de pasta é colhida a uma taxa correspondente ao



rendimento anual máximo sustentável de florestas produtivas com a produção de madeira como sua função primária. A fração base ( $ET_a / Y_{wood}$ ), de onde a pegada hídrica é derivada, encerra em si vários pressupostos que são teoricamente questionáveis e, alguns, claramente incorrectos ou dificilmente quantificáveis. Por exemplo, a separação entre “água verde” e “água azul” é muito difícil, senão impossível, já que o consumo de água verde afecta obrigatoriamente as disponibilidades de água azul e, uma vez evapotranspirada, a água verde pode converter-se em água azul (Falkenmark e Rockström, 2006).

Em primeiro lugar, o conceito de pegada hídrica verde assume incorrectamente que a evapotranspiração é uma perda (Wichelns, 2010, 2017; Gawel e Bernsen, 2013; Launiainen *et al.*, 2013; Sutterlüty *et al.*, 2017). Como anteriormente referido, (ver 2.2.3 e Figura 2.6), uma parte significativa da Evapotranspiração ( $ET$ ), a Transpiração ( $T$ ), é o “custo” em água da fotossíntese e, portanto, da produção de biomassa. No clima mediterrânico  $T$  é cerca de 72-76 % de  $ET$  (David *et al.*, 2006; Paço *et al.*, 2009). Assim, em bacias hidrográficas a  $ET$  só pode ser considerada uma perda para os utilizadores a jusante (abastecimento urbano, industrial e agricultura de regadio), mas não para os ecossistemas a montante (i.e.  $ET$  não é uma perda absoluta). O facto de o conceito WFN assumir que toda a água evapotranspirada por uma plantação florestal constitui uma apropriação humana do recurso água (logo, uma “perda”) e deve ser contabilizada na metodologia, sem descontar os consumos que ocorreriam caso existisse um “coberto de referência” (coberto vegetal existente antes da plantação) contribui para a sobreestimativa da pegada hídrica dos produtos com origem na agricultura ou silvicultura (Pffister e Hellweg, 2009; Wichelns, 2010; 2015; Launiainen *et al.*, 2013; Sutterlüty *et al.*, 2017). Por outro lado, e como referido anteriormente, considerar uma “perda” a água consumida na evapotranspiração é inconsistente com os princípios do ciclo hidrológico já que esta é devolvida ao sistema (ver 2.2.1) (Ellison *et al.*, 2012; 2017).

Para além disso, a transpiração é a água utilizada na produção da biomassa total do ecossistema (tronco, ramos, raízes e folhas) (ver 2.2.2.1.1 e Figura 2.3), e não apenas na dos troncos ( $Y_{wood}$ ) como é considerado no denominador da Equação 5.1. As raízes, ramos e folhas não são retiradas do ecossistema, sendo biologicamente recicladas no local. Assim, o pressuposto subjacente à equação 5.1 de que toda a evapotranspiração ( $ET_a$ ) é usada para a produção de biomassa do tronco é conceptualmente errado, em termos de fisiologia vegetal, e sobrestima o valor da “pegada hídrica”. Este erro conceptual pode originar absurdos. Por exemplo, se uma mesma floresta originar dois produtos diferentes, a mesma  $ET_a$  total será alocada aos dois, enquanto o ecossistema

evapotranspira uma só vez (é o clássico “double counting”). Outro dos problemas no uso da equação 5.1. encontra-se no cálculo da  $ET_a$ , dado que não são consideradas em separado as suas duas principais componentes: perda por intercepção ( $I$ ) e transpiração ( $T$ ). Como já referido,  $I$  não tem retorno em termos de produção de biomassa, mas  $T$  tem. A proporção relativa das duas componentes da  $ET$  é muito variável com o clima:  $T$  é a principal componente no clima mediterrânico, ao contrário do que acontece em climas temperados marítimos (ver 2.2.5.3.1). Ao ignorar este aspecto, comparações entre os valores da pegada hídrica de florestas de diferentes regiões climáticas poderão ser problemáticas. De facto, num estudo posterior ao inicial, os autores da metodologia concluíram que a pegada hídrica de uma folha papel A4 para impressão pode variar entre 2 e 13 litros (van Oel e Hoekstra, 2010; 2012). Esta inconsistência tinha já sido notada e, por exemplo, Pffister e Hellweg (2009) propuseram que os consumos hídricos de um determinado produto, com origem na agricultura ou silvicultura, fossem quantificados aplicando um índice de *stress* hídrico específico para cada local de produção.

Finalmente, a aplicação da equação 5.1 em diferentes escalas espaciais poderá ainda induzir a outro tipo de erros. De facto, em escalas espaciais de grandes dimensões, parte da  $ET$  poderá ser reciclada dentro da própria área em análise (isto é, pode precipitar) (van der Ent *et al.*, 2014). Se isto acontecer, esta reciclagem interna de água deverá ser descontada no valor de  $ET$  (não é uma perda para o sistema) (Ellison *et al.*, 2012). Esta questão não foi tida em conta na versão inicial de aplicação da equação 5.1, apesar de estar a ser considerada em versões mais recentes (van der Ent *et al.*, 2010, 2014). O problema é de difícil, e relativamente imprecisa, quantificação. No limite, à escala planetária a reciclagem é total (ver secção 2.2.1) e, nessa escala, a pegada hídrica de qualquer produto é zero.

Por tudo o acima exposto, o cálculo da pegada hídrica de “água verde” parece pouco robusto, e com limitações metodológicas apresentando diversas fragilidades (Gawel e Bernsen, 2013; Perry, 2014; Chenoweth *et al.*, 2014; Quinteiro *et al.*, 2017), que podem comprometer a sua aplicabilidade como indicador fiável e generalizável.

A título de exemplo e experimentação, a metodologia foi aplicada a dois casos concretos em Portugal, referentes à indústria papeleira, com o intuito de avaliar a fiabilidade dos resultados e as incoerências detectadas.

## 5.2 Aplicação da metodologia a povoamentos de eucalipto para produção de papel.

Nos anos que se seguiram à primeira publicação da WF do papel, vários estudos foram publicados nesta área, a saber, o relatório UPM-Kymmene (2011) e um estudo de caso sobre a floresta e os produtos de base florestal, o caso Fennoscandian (Launiainen *et al.*, 2014).

Nos últimos anos tem sido sugerido que a silvicultura nórdica sofreu, em termos reputacionais, com a comunicação existente focada unicamente no tamanho da WF dos produtos de base florestal, sem uma avaliação adequada da sustentabilidade da WF. Desta forma, também a indústria papelreira portuguesa se debruçou sobre a pegada hídrica do papel, aplicando a metodologia de cálculo e considerando, como base de cálculo para a “água verde”, os povoamentos de eucalipto (enquanto matéria prima) para a produção de papel.

### 5.2.1 Considerando a alocação da evapotranspiração em função da partição de biomassa

Para o exercício de alocação da evapotranspiração em função da partição de biomassa considerou-se um povoamento de *Eucalyptus globulus* equiênio, com características “médias” à idade de corte: 1000 árvores por hectare, 12 anos de idade.



**Figura 5.1: Esquema ilustrativo das componentes de biomassa**

Os dados foram recolhidos a partir de um eucaliptal localizado na região centro, a 10 km da Costa Atlântica (Quinta do Furadouro), para o qual António *et al.* (2007) e Soares e Tomé (2012) estudaram a partição de biomassa (Quadro 5.1., Figura 5.1). Para este

eucaliptal, assumindo a dimensão da árvore média como 20 m de altura e 18 cm de diâmetro e uma densidade de 1000 arv ha<sup>-1</sup> na altura do corte, foram determinadas as biomassas por componentes com base:

- nas equações da biomassa por componentes desenvolvidas por António *et al.* (2007) e em dados de árvores abatidas (povoamentos em alto fuste e em talhadia) na região de expansão do eucalipto em Portugal;
- na equação da biomassa do sistema radicular desenvolvida por Soares e Tomé (2012) e em abates de árvores no ensaio de Fertilização e Rega, localizado em Olho Marinho, junto à Quinta do Furadouro.

**Quadro 5.1: Distribuição da biomassa total, num povoamento de *Eucalyptus globulus*, pelas suas componentes.**

(Adaptado de António *et al.*, 2007 e Soares e Tomé, 2012)

Biomassa Total do Povoamento (Mg ha <sup>-1</sup> )			173,85
Componentes da Biomassa Total			
			Mg ha <sup>-1</sup> %
Biomassa da parte aérea			138,43 79,6
Copa	Folhas	8,92	5,1
	Ramos	11,06	6,4
	Rolária	103,59	59,6
	Casca	14,87	8,6
Biomassa subterrânea			35,42 20,4

No seguimento das considerações referidas em 5.1., sendo a biomassa do tronco ( $Y_{wood}$ ) apenas 59,6% do total, o valor da  $ET_a$  usado na equação 5.1 deveria ser reduzido em concordância (59,6%). Tomando como certa a estimativa inicial do WFN de 10 L de água por folha de papel A4, só isto reduziria substancialmente o valor numérico da pegada hídrica verde de uma folha de papel A4: para  $10 \times 0,596 = 5,96$  L.

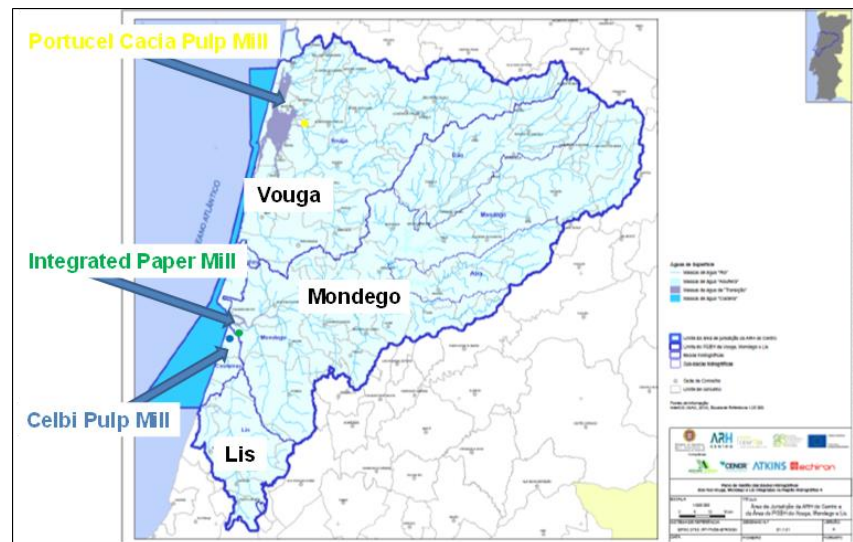
### 5.2.2 Considerando a evapotranspiração e a produção média numa região hidrográfica.

Neste exercício, alguns pressupostos foram considerados de acordo van Oel e Hoekstra (2010) no que respeita à componente da “água cinzenta” e às componentes da “água verde” e da “água azul”.

Assim, a componente da “água cinzenta” foi considerada nula, dado que as fábricas se situam junto à costa e os efluentes (após tratamento) são devolvidos ao meio receptor

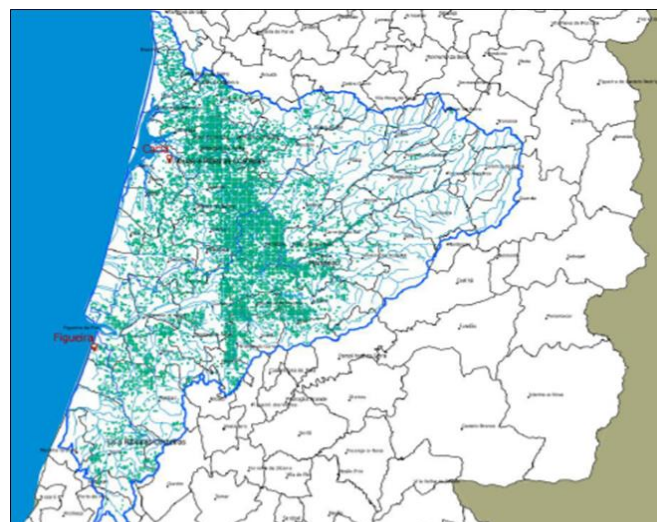
(oceano Atlântico). As componentes “água verde” e “água azul”, na fase de produção florestal são consideradas em conjunto (van Oel e Hoekstra, 2010).

Para a gestão dos recursos hídricos, o território português está dividido em 10 Regiões Hidrográficas (APA, 2013). A região de estudo seleccionada foi a "Região Hidrográfica RH4" (Figura 5.2), que abrange 3 bacias hidrográficas: dos rios Mondego, Vouga e Lis, relevante e representativa do abastecimento de matéria prima (Figura 5.3) para a indústria papeleira portuguesa.



**Figura 5.2: Bacias hidrográficas dos rios Mondego, Vouga e Lis**

(Adaptado de ARH Centro, 2012)



**Figura 5.3: Cobertura florestal (*Eucalyptus globulus*) nas três bacias hidrográficas seleccionadas em Portugal.**

(Adaptado de RAIZ, 2014)

O quadro 5.2 apresenta os dados de base para a região escolhida na aplicação do exercício de cálculo, correspondente às bacias hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis.

**Quadro 5.2: Dados do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis - RH4**

Parâmetro	Valor	Unidades	Fonte
<b>Área da bacia</b>	11682	km <sup>2</sup>	(1)
<b>Ocupação</b>			
Urbana	953	km <sup>2</sup>	(2)
Agrícola	2586	km <sup>2</sup>	(2)
Floresta	7812	km <sup>2</sup>	(2)
Floresta de eucalipto	2135	km <sup>2</sup>	(3)
Outras	332	km <sup>2</sup>	(2)
<b>Água</b>			
Recarga da água subterrânea	1606	hm <sup>3</sup> /ano	(4)
Escoamento anual médio	6827	hm <sup>3</sup> /ano	(4)
<b>Consumos</b>			
Necessidades indústria	87,2	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades agricultura	281,5	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades pecuária	3,5	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades recreativas (golfe)	0,5	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades C. termoelectricas	5,7	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades domésticas/ urbanas	128,6	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Necessidades hídras totais	506,9	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
<b>Escoamentos sobantes</b>	6.282,3	hm <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup>	(4)
Utilização dos recursos	7,5	%	(4)
<b>Clima</b>			
Precipitação média anual	1136	mm	(4)
Temperatura média anual	13,7	°C	(4)
Temperatura máxima (média)	15,7	°C	(4)
Temperatura mínima (média)	9,2	°C	(4)
<b>Produtividade média</b>	13,6	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	(5)
<b>Evapotranspiração média</b>	720	mm	(4)

Fontes:

- (1) Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2010)
- (2) Direcção Geral do Território (2010)
- (3) Autoridade Florestal Nacional (2010)
- (4) Administração da Região Hidrográfica do Centro, IP (2012)
- (5) CELPA (2015)

A evaporação total da área florestal foi considerada para área da ARH 4 (ARH Centro, 2012). Para o cálculo da pegada hídrica, neste exercício, o valor das variáveis utilizadas na equação 5.1 encontra-se no Quadro 5.3.

Atribuiu-se a  $Y_{wood}$ , o valor médio do volume de eucalipto explorado pelas empresas associadas da CELPA, para a região considerada (CELPA, 2015). Para a evapotranspiração do ecossistema ( $ET_a$ ), a WFN recomenda usar o valor referenciado no modelo CROPWAT (FAO, 2009). No entanto, para este caso de estudo, o modelo é pouco preciso, dado que se refere a uma área bastante superior à das bacias hidrográficas consideradas (região da ARH4), ver Quadro 5.2.

Relativamente à variável  $f_{paper}$  o valor utilizado,  $1,74 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$  (The Navigator Company, com.pes.), reflecte o consumo específico de madeira das fábricas da região considerada e é bastante inferior às médias globais estimadas para as pastas e para os produtos de papel (e.g. 2,50 e  $3,51 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ , para pasta mecânica e papel de impressão, respectivamente) (Schyns *et al.*, 2017). As características edafoclimáticas da área de estudo apresentam condições favoráveis ao desenvolvimento dos povoamentos de eucalipto e garantem um maior rendimento específico da madeira. Os valores de  $f_{paper}$  acima referidos correspondem a médias de estimativas obtidas para os principais biomas florestais e encerram pronunciadas variações espaciais decorrentes de calcular a esse nível de resolução (Schyns *et al.*, 2017), justificando-se a utilização do valor, mais preciso, comunicado para a região em análise.

Paras as restantes variáveis consideraram-se valores referidos na literatura ( $f_{water}$ ) e recomendados pelo WFN ( $f_{recycling}$  e  $f_{value}$ ) (van Oel e Hoekstra, 2010; 2012).

**Quadro 5.3: Variáveis para o cálculo do WF dos produtos papeleiros portugueses**

Parâmetro	$Y_{wood}$ ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ )	$ET$ ( $\text{mm ano}^{-1}$ )	$f_{water}$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	$f_{paper}$ ( $\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$ )	$f_{recycling}$ <i>adimensional</i>	$f_{value}$ <i>adimensional</i>
Valor	13,6	7200	0,4	1,74	0,1785	1
Fonte	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)

Fontes:

(1) CELPA (2015)

(2) Administração da Região Hidrográfica do Centro, IP (2012)

(3) González-García *et al.*, (2009)

(4) The Navigator Company, comunicações pessoais, 2016

(5) van Oel e Hoekstra, (2010, 2012)

Mesmo alocando 100% da evaporação da floresta à produção de madeira (rolaria), estima-se um valor de 3,78 litros por folha de papel A4 (1 ton papel ~ 200.417 folhas). Se fosse adicionalmente utilizada a partição de biomassa e evapotranspiração referidas em 5.2.1. o valor da pegada hídrica/folha de papel desceria ainda para 2,25 litros, no limite inferior da gama de pegada hídrica indicada em van Oel e Hoekstra (2010; 2012) para uma folha papel de impressão A4 (entre 2 a 13 litros) e muito abaixo dos 10 litros inicialmente sugeridos (Hoekstra e Chapagain, 2008). Adicionalmente, se à evapotranspiração do eucaliptal pudessem ser descontados os consumos hídricos do “coberto de referência” (coberto vegetal existente) (Ellison *et al.*, 2012; Launiainen *et al.*, 2014), o valor obtido para a pegada hídrica do papel produzido em Portugal seria com certeza ainda inferior. No entanto, como mencionado anteriormente, os valores obtidos para a pegada hídrica constituem apenas um indicador numérico para estimar a água utilizada na produção dos produtos com origem na floresta e não reflectem o impacto da produção nos recursos hídricos ou no ecossistema (Wichelns, 2010; 2017). Conclusões semelhantes foram obtidas na Nova Zelândia para a produção de lenços de papel: apesar da pegada hídrica volumétrica ser bastante elevada (1284 kg por kg de produto), o seu impacto no nas disponibilidades hídricas é mínimo (Mcdevitt *et al.*, 2012). Estes dois simples exercícios de cálculo, aplicados à produção de papel a partir de povoamentos de *Eucalyptus globulus* em Portugal, revelam quão manipulável e inconsistente parece ser a metodologia.

Desta forma, considera-se o cálculo da pegada hídrica, segundo WFN uma ferramenta ambiciosa para medir a apropriação humana e promover o uso sustentável da água doce. No entanto, as suas limitações metodológicas e as inconsistências com aspectos fundamentais do ciclo hidrológico fazem com que a sua aplicação deva ser feita com reserva e a sua utilidade real questionada (Chenoweth *et al.*, 2014; Perry, 2014). De facto, a relevância da aplicação da ferramenta WFN reside principalmente no facto de poder servir de base para o estudo de usos alternativos (bens, serviços) para a água e comparações entre a pegada hídrica de produtos semelhantes ou do mesmo produto entre regiões distintas devem ser feitas com cautela (Schyns *et al.*, 2017).

Utilizando estes casos de estudo verifica-se que a sua utilização é altamente questionável e problemática para avaliar o uso da água na floresta e nos produtos de base florestal (Launiainen *et al.*, 2013). De facto, dado que a componente “água verde” é responsável por mais de 90% da pegada hídrica (UPM-Kymmene, 2011; van Oel e Hoekstra, 2012), as dificuldades metodológicas relacionadas com a determinação da evapotranspiração introduzem grande incerteza nas estimativas obtidas para os produtos de papel (Launiainen *et al.*, 2013).



A adequabilidade da metodologia tem sido também questionada por diversos autores (e.g. Gawel e Bernsen, 2013; Launiainen *et al.*, 2013; Chenoweth *et al.*, 2014; Perry, 2014; Wichelns, 2010, 2015; 2017; Sutterlüty *et al.*, 2017) que referem que a adopção generalizada da sua aplicação, traduz de uma forma simplista uma realidade complexa, e pode conduzir a utilizações abusivas e demagógicas a nível comercial, pressões de organizações ambientalistas e até ao desenvolvimento de regulamentação e legislação incorrecta.

## 6. Considerações finais e sugestões

A metodologia WFN é uma ferramenta pioneira destinada a quantificar o impacto de um produto ou serviço nos recursos hídricos. O conceito teve uma rápida expansão, trazendo para o centro do debate público as questões relacionadas com a escassez hídrica e o uso da água. O debate em torno da metodologia rapidamente extrapolou a comunidade científica, tendo sido adoptado por países, empresas e organizações. No entanto, a sua aplicação está longe de ser consensual. Entre os argumentos que questionam a sua aplicação e utilidade, destacam-se:

- A metodologia WFN assume que os problemas de escassez hídrica são globais. No entanto, os conflitos de interesse em relação à água são essencialmente locais, onde vários utilizadores podem competir por um recurso escasso. Ao contrário do verificado para o ciclo do carbono, em que uma redução das emissões a nível local gera benefícios a nível global, a redução do consumo a nível global não resulta num aumento das disponibilidades hídricas nas regiões áridas;
- A metodologia está demasiado focada na quantificação do uso da água ao longo da cadeia de produção, ignorando o impacto que o consumo tem nos recursos hídricos e nos ecossistemas e sustentabilidade dos mesmos;
- O conceito WFN é especialmente penalizador para os produtos com origem na agricultura ou silvicultura já que a componente “água verde” é a principal responsável pela pegada hídrica;
- A ferramenta é muito sensível ao método de avaliação da evapotranspiração podendo resultar em valores de pegada hídrica significativamente diferentes para o mesmo produto e/ou local;
- A evapotranspiração é considerada uma “apropriação humana” do recurso água e, assim, entendida como uma “perda”, ignorando que a água evapotranspirada é devolvida ao ciclo hidrológico (não se perde) e a água da componente transpiração corresponde ao “custo” da produção de biomassa.

Os dois exercícios de cálculo, aqui apresentados, para povoamentos de eucalipto em Portugal, evidenciam algumas das fragilidades da metodologia do *Water Footprint Network*, e em particular para o cálculo da “água verde”, ao considerar a evapotranspiração de uma cultura/floresta de forma genérica e absoluta.

Os resultados indicam que a pegada hídrica de uma folha de papel A4, produzida em Portugal, é de 2,25 litros por folha. Este valor está muito abaixo dos 10 litros por folha inicialmente reportados, aproximando-se do limite inferior da gama divulgada posteriormente (~2-13 litros por folha). No entanto, o valor da pegada hídrica por si só, sejam 2, 10 ou 13 litros por folha de papel produzida, apenas reflecte os consumos hídricos relativos a cada local de produção e não retrata os impactos causados na utilização dos recursos hídricos a nível local e/ou global.

Dadas as fragilidades da metodologia, principalmente ao nível do cálculo da evapotranspiração, especialmente problemática no caso de produtos com origem na agricultura ou floresta, quaisquer comparações da pegada hídrica entre locais e/ou produtos semelhantes ou usos alternativos devem ser realizadas com cautela.

Na realidade, o conceito de pegada hídrica do WFN não parece nem robusto, nem solidamente fundamentado para uma avaliação correcta do uso de água pelas florestas e do seu impacto nos produtos da indústria transformadora. Novos modelos e aproximação são claramente necessários. Permanecem muitas questões sobre a interpretação correcta do conceito de pegada hídrica dentro da indústria de pasta e papel, apesar das melhorias significativas nos indicadores de eficiência do uso da água, a indústria papeleira ainda faz parte de um problema e não da solução

## 7. Referências Bibliográficas

Administração da Região Hidrográfica do Centro, IP. (2012). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis - Integrados na Região Hidrográfica* 4. Coimbra: ARH Centro, I.P.

Agência Portuguesa do Ambiente. (2012). *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água*. Acedido em 21 de Dezembro de 2016. Disponível em: [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/CONSULTA\\_PUBLICA/2012/PNUEA/Implementacao-PNUEA\\_2012-2020\\_JUNHO.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/CONSULTA_PUBLICA/2012/PNUEA/Implementacao-PNUEA_2012-2020_JUNHO.pdf)

Agência Portuguesa do Ambiente. (2013). *Planos de Gestão de Região Hidrográfica - 1.º Ciclo*. Acedido em 21 de Dezembro de 2016. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/dqa/planos-de-gestao-de-bacias-hidrograficas>

Agência Portuguesa do Ambiente. (2015). *Plano Nacional da água*. Acedido em 21 de Dezembro de 2016. Disponível em: [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/Políticas/Água/PlaneamentoGestao/PNA/2015/PNA2015.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Água/PlaneamentoGestao/PNA/2015/PNA2015.pdf)

Almeida, A.P. e Riekerk H. (1990). Water balance of *Eucalyptus globulus* and *Quercus suber* stands in south Portugal. *Forest Ecology and Management*. 38: 55-64.

Allan, J.A. (1998). Virtual water: A strategic resource: Global solutions to regional deficits. *Groundwater*. 36: 545-546.

Allan, J.A. (2003). Virtual Water - the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? *Water International*. 28 (1): 106-113.

Andréassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. 291: 1-27.

António, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P. e Fontes, L. (2007). Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*. 37: 895-906.

Autoridade Florestal Nacional. (2010). *5º Inventário Florestal Nacional*. Lisboa: AFN, Direcção Nacional de Gestão Florestal, MADRP.

Benyon, R.B., Theiveyanathan, S. e Doody, T.M. (2006). Impacts of tree plantations on groundwater in south-eastern Australia. *Australian Journal of Botany*. 54: 181-192.

Berger, M. e Finkbeiner, M. (2012). Methodological challenges in volumetric and impact: oriented water footprints, *Journal of Industrial Ecology*. 17: 79-89.

Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefit of forests. *Science*. 320: 1444-1449.

Booth, T.H. (2013). Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*. 301: 28-34.

- Bosch, J.M. e Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 55: 3-23.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W. e Vertessy, R.A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*. 310: 28-61.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Beverly, C.R., Ong, C.K., Khan, A.A.H. e Bleby, T.M. (2001a). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*. 21: 589-598.
- Burman, N.W., Croft, J., Engelbrecht, S., Ladenika, A.O., MacGregor, O.S., Maepa, M., Bodunrin, M.O., Harding, K.G. (2018). Review: life-cycle assessment, water footprinting, and carbon footprinting in Portugal. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 23 (8): 1693-1700.
- Calder, I.R. (1998). Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology*. 18: 625-631.
- Calder, I.R. (2007). Forests and water - Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*. 251: 110-120.
- Calder, I., Amezaga, J., Aylward, B., Bosch, J. e Fuller, L. (2004). Forest and water policies: the need to reconcile public and science conceptions. *Geologica Acta*. 2: 157-166.
- Camargo, J. (2013, 10 Outubro). Eucaliptugal, o ecocídio da floresta nacional. *Revista Visão*. Disponível em: <http://visao.sapo.pt/ambiente/opiniaoverde/joaocamargo/eucaliptugal-o-ecocidio-da-floresta-nacional=f752575>
- CELPA – Associação da Indústria Papeleira. (2015). *Boletim Estatístico da Indústria Papeleira Portuguesa*. Lisboa: CELPA.
- CEPI - Confederation of European Paper Industries, (2012). Forests and Water Information Paper FOR-168-10 Final. Acedido em 21 de Maio, 2014.
- CEPI - Confederation of European Paper Industries, (2013). CEPI Sustainability Report 2013. Acedido em 1 de Outubro, 2016. Disponível em: [http://www.cepi-sustainability.eu/uploads/Full\\_sustainability2013.pdf](http://www.cepi-sustainability.eu/uploads/Full_sustainability2013.pdf).
- Chahine, M.T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*. 359: 373-380.
- Chaves, M.M., Pereira, J.S, Maroco, J., Ricardo, C.P.P., Osório, M.L., Carvalho, I., Faria, T. e Pinheiro, C. (2002). How plantscope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*. 89: 907-916.
- Chenoweth, J., Hadjikakou, M. e Zoumides, C., (2014). Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 2325-2342.

Christ, K.L. e Burrit, R.L. (2017). What Constitutes Contemporary Corporate Water Accounting? A Review from a Management Perspective. *Sustainable Development*. 25 (2): 138-149.

Comissão Europeia. (2012). *A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources*. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0673>

Comissão Europeia. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and control*. Disponível em: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP\\_revised\\_BREF\\_2015.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP_revised_BREF_2015.pdf)

Cook, C. e Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*. 22: 94-102.

Cosgrove, W. (2013). Water Futures: the evolution of water scenarios. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 5 (6): 559-565.

D'Almeida, C., Vörösmarty, C.J., Hurtt, G.C., Marengo, J.A., Dingman, S.L. e Keime, B.D. (2007). The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*. 27: 63-647.

David, J.S., Bellot, J., Birot, Y. e David, T.S. (2011). Water fluxes in forests, em: Birot, Y., Gracia, C. e Palahi, M. (Eds.) *Water for forests and for people in the Mediterranean region – A challenging balance*. What Science Can Tell Us 1. (pp. 37-42). Joensuu: European Forest Institute.

David, J.S., David, T.S. e Valente, F. (2007). O eucaliptal e os recursos hídricos, em: Alves, A.M., Pereira, J.S., Silva, J.M.N. (Eds.) *O Eucaliptal em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica*. (pp. 113-135). Lisboa: ISA Press.

David, T.S., Ferreira, M.I., David, J.S. e Pereira, J.S. (1997). Transpiration from a mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. *Oecologia*. 110: 153-159.

David, T.S., Gash, J.H.C., Valente, F., Pereira, J.S., Ferreira, M.I. e David J.S. (2006). Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*. 20: 2713-2726.

David, J.S., Henriques, M.O., David, T.S., Tomé, J. e Ledger, D.C. (1994). Clearcutting effects on streamflow in coppiced *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. *Journal of Hydrology*. 162: 143-154.

David, J.S., Valente, F. e Gash, J.C. (2005). Evaporation of intercepted rainfall, em: Anderson, M.G. (Ed.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Volume I, Chapter 43. (pp. 627-634). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

Direcção Geral do Território. (2010). *Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007)*. Memória Descritiva. Lisboa: DGT.

Directiva Quadro da Água (DQA). (2000). Disponível em: [http://www.apambiente.pt/dqa/assets/01-2000\\_60\\_ce---directiva-quadro-da-%C3%A1gua.pdf](http://www.apambiente.pt/dqa/assets/01-2000_60_ce---directiva-quadro-da-%C3%A1gua.pdf)

Drake, P.L., Mendham, D.S., White, D.A., Ogden, G.N. e Dell, B. (2012). Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: a comparison of stand-scale water balance components. *Plant and Soil*. 350: 221-235.

European Environment Agency. (2009). *EEA Report: Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought*. Copenhagen: EEA.

Ellison, D., Futter, M.N. e Bishop, K. (2012). On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*. 18: 806-820.

Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., van Noordwijk, M., Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D.L.A., Spracklen, D.V., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. e Sullivan, C.A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*. 43: 51-61.

European Water Partnership. (2010). Water for a sustainable Europe – our vision for 2030. Acedido em 1 de Outubro, 2016. Disponível em: <http://www.ewp.eu/wp-content/uploads/2010/12/water-vision-for-europe.pdf>

Falkenmark, M. e J. Rockström, (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(3): 129–132.

Farley, K.A., Jobbágy, E.G. e Jackson, R.B. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*. 11: 1565-1576.

Fernández, C., Veja, J.A., Gras, J.M. e Fonturbel, T. (2006). Changes in water yield after a sequence of perturbations and forest management practices in an *Eucalyptus globulus* Labill. watershed in Northern Spain. *Forest Ecology and Management*. 234: 275-281.

Ferreira, A.J.D. (2001). Processos hidrológicos e hidroquímicos em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. e *Pinus pinaster* Aiton, em: Andresen, T., Coelho, C., Arroja, L. e Miranda, A.I. (Eds.) *Actas da VII Conferência Nacional sobre Qualidade do Ambiente*. (pp. 3-30). Aveiro.

Fibria. (2013). Report 2013 – Steering a steady course. Acedido em 21 de Dezembro de 2016. Disponível em: <http://www.fibria.com/relatorio2013/shared/report-de-2013-steering-a-steady-course-27may2014.pdf>

Fibria. (2015). Gerenciamento de recurso hídrico na indústria de celulose, *Actas do 48º Congresso da ABTCP*. São Paulo, Brasil. <http://www.fibria.com/>

Food and Agriculture Organization. (2009). Global map of yearly actual evapotranspiration: resolution 5 arc minutes, for the period 1961-1990. Roma: FAO.

Food and Agriculture Organization (2013). *Forests and Water – International Momentum and Action - a synthesis report*. Roma: FAO.

Food and Agriculture Organization. (2016). *Global Forest Resources Assessment 2015: How Are the World's Forests Changing?*. Roma: FAO.

Forrester, D.I., Collopy, J.J. e Morris, J.D. (2010). Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*. 259: 1754-1760.

Fritzsche, F., Abate, A., Fetene, M., Beck, E., Weise, S. e Guggenberger G. (2006). Soil-plant hydrology of indigenous and exotic trees in an Ethiopian montane forest. *Tree Physiology*. 26: 1043-1054.

Gawel, E. e Bernsen, K., (2013). What is wrong with virtual water trading? On the limitations of the virtual water concept. *Environment and Planning C*. 31: 168-181.

George, R.J., Nulsen, R.A., Ferdowsian, R. e Raper, G.P. (1999). Interactions between trees and groundwaters in recharge and discharge areas - A survey of Western Australian sites. *Agricultural Water Management*. 39: 91-113.

Gleick, P.H. (Ed). (1993). *Water in crisis. A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Nova Iorque: Oxford University Press.

González-García, S., Berg, S., Feijoo, G. e Moreira, M.T. (2009). Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 14 (4): 340-353.

Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*. 42 (2): 193-200.

Gras, J.M., Vega, J.A e Bara, S. (1993). Six years of study on fast growing forest plantations catchments in the Northwest of Spain. *Acta Geologica Hispanica*. 28 (2-3): 111-117.

Hartmann, D.L. (2016). *Global physical climatology* (2.<sup>a</sup> edição). Amsterdão: Elsevier Science.

Hewlett, J.D. (1982). *Principles of Forest Hydrology*. Athens: The University of Georgia Press.

Hoekstra, A.Y. (Ed). (2003). *Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Delft: IHE.

Hoekstra, A.Y. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecologic Economics*. 68, 1963-1974.

Hoekstra, A.Y. e Chapagain, A.K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*. 21 (1): 35-48.

Hoekstra, A.Y. e Chapagain, A.K. (2008). *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Oxford: Blackwell Publishing.



- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. e Mekonnen, M.M. (2009). *Water Footprint Manual: State of the Art 2009*. Enschede: Water Footprint Network.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. e Mekonnen, M.M. (2011). *Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London: Earthscan.
- Hoekstra, A.Y. e Hung, P.Q. (2002). Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11. Delft: IHE.
- Hoekstra, A.Y. e Mekonnen, M.M. (2011). Global water scarcity: the monthly blue water footprint compared to blue water availability for the world's major river basins. Value of Water Research Report Series No. 53. Delft: UNESCO-IHE.
- Hoekstra, A.Y. e Mekonnen, M.M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 109 (9): 3232-3237.
- Hoffmann, W.A. e Jackson, R.B. (2000). Vegetation–climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate*. 13: 1593-1602.
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C. e Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*. 31 (3): 219-230.
- Instituto da Conservação da Natureza e Florestas. (2013). *IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares*. Lisboa: ICNF.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K e Meyer, L.A. (Eds.)]. Genebra: IPCC.
- International Organization for Standardization. (2014). ISO Briefing Note: *Measuring the impact of water use and promoting efficiency in water management*. Disponível em: [http://www.iso.org/iso/iso14046\\_briefing\\_note.pdf](http://www.iso.org/iso/iso14046_briefing_note.pdf)
- Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., le Maitre, D.C., McCarl, B.A. e Murray, B.C. (2005). Trading carbon for water with biological carbon sequestration. *Science*. 310: 1944-1947.
- Jewitt, G. (2005). Water and forests, em: Anderson, M.G. (Ed.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Volume 5, Chapter 186. (pp. 2895-2909). Chichester: John Wiley & Sons.
- Jones, H.G. (2014). *Plants and microclimate* (3.<sup>a</sup> edição). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kuchment, L.S. (2004). The Hydrological cycle and human impact on it, em: Hoekstra, A.Y. e Savenije, H.H.G. (Eds.) *Water Resources Management*, Encyclopedia of Life Support Systems. (40 pp.). Oxford: EOLSS Publishers.

- Launiainen, S., Futter, M. N., Ellison, D., Clarke, N., Finér, L., Högbom, L., Laurén, A., e Ring, E. (2014). Is the Water Footprint an appropriate tool for forestry and forest Products: The Fennoscandian Case. *AMBIO*. 43: 244-256.
- Lee, R. (1980). *Forest Hydrology*. New York: Columbia University Press.
- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A.Y., e Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*. 18: 42-49.
- Loustau, D., Berbigier, P., Roumagnac, P., Arruda-Pacheco, C., David, J.S., Ferreira, M.I., Pereira, J.S. e Tavares R. (1996). Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal course of water flux through maritime pine. *Oecologia*, 107: 33-42.
- Lundqvist, J. (2000). A global perspective on water and the environment. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. 25 (3): 259-264.
- Manzoni, S., Vico, G., Katul, G., Palmroth, S., Jackson, R.B. e Porporato, A. (2013). Hydraulic limits on maximum plant transpiration and the origin of the safety-efficiency trade-off. *New Phytologist*. 198: 169-178.
- Mauger, G.W., Bari, M., Boniecka, L., Dixon, R.N.M., Dogramaci, S.S. e Platt, J. (2001). *Salinity Situation Statement: Collie River*. Water Resource Technical Report Series No WRT 29. Perth: *Water and Rivers Commission*.
- McNaughton, K.G. e Jarvis, P.G. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation, em: Koslowski, T.T. (Ed.) *Water deficits and plant growth*, Vol. VII. (pp. 1-47). Nova Iorque: Academic Press.
- Mcdevitt, J.E., Love, S.R., Seadon, J.K., Allison, R.W. (2012). An evaluation of alternative water footprint methodologies using an indicative tissue paper supply chain. *Appita Journal: Journal of the Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry*. 65 (2): 159-164
- Miranda, P., Valente, M.A., Tomé, A.R., Trigo, R., Coelho, M.F.S.E., Aguiar, A. e Azevedo E.B. (2006). O clima em Portugal nos Séculos XX e XXI, em: Santos, F.D. e Miranda, P. (Eds.) *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, impactos e medidas de adaptação – Projecto SIAM II*. (pp. 45-113). Lisboa: Gradiva.
- Monteith, J.L. (1973). *Principles of environmental physics*. Nova Iorque: Elsevier.
- Oki, T. (2005). The hydrologic cycles and global circulation, em: Anderson, M.G. (Ed.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Volume 1, Chapter 2. (pp. 13-22). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Olbrich, B.W. (1991). The verification of the heat pulse velocity technique for estimating sap flow in *Eucalyptus grandis*. *Canadian Journal of Forest Research*. 21: 836-841.
- Paço, T.A., David, T.S., Henriques, M.O., Pereira, J.S., Valente, F., Banza, J., Pereira, F.L., Pinto, C. e David J.S. (2009). Evapotranspiration from a Mediterranean evergreen oak savannah: The role of trees and pasture. *Journal of Hydrology*. 369: 98-106.

- Pinto, C., Pereira, J.S., David, J.S. (2014). As Plantações de *Eucalyptus globulus* e a água. Relatório interno CELPA.
- Peixoto, J.P., Ort, A.H. (1992). *Physics of Climate*. Nova Iorque: American Institute of Physics.
- Pereira, J.S., Mateus, J.A., Aires, L.M., Pita, G., Pio, C., David, J.S., Andrade, V., Banza, J., David, T.S., Paço, T.A. e Rodrigues, A. (2007). Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems – the effect of drought. *Biogeosciences*. 4: 791-802.
- Perry, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail?. *Agricultural Water Management*. 134: 119-125.
- Pfister, S., e Hellweg, S. (2009). The water “shoesize” vs. footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106 (35). E93-E94.
- Postel, S.L., Daily, G.C. e Ehrlich, P.R., (1996). Human appropriation of renewable freshwater. *Science*. 271: 785-788.
- Quinteiro, P., Dias, A.C., Silva M., Ridoutt, B.G. e Arroja, L. (2015). A contribution to the environmental impact assessment of green water flows. *Journal of Clean Production*. 93: 318-329.
- Quinteiro, P., Ridoutt, B.G., Arroja, L. e Dias, A.C. (2017). Identification of methodological challenges remaining in the assessment of a water scarcity footprint: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. DOI: 10.1007/s11367-017-1304-0
- Rijsberman, F.R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction?. *Agricultural Water Management*. 80 (1-3): 5-22.
- Robinson, M., Cognard-Plancq, A.L., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Führer, H.W., Hall, R., Henriques, M.O., Marc, V., McCarthy, R., McDonnell, M., Martin, C., Nisbet, T., O'Dea, P., Rodgers, M. e Zollner, A. (2003). Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*. 186: 85-97.
- Rodríguez-Suárez, J.A., Diaz-Fierros, F., Perez, R. e Soto, B. (2014). Assessing the influence of afforestation with *Eucalyptus globulus* on hydrological response from a small catchment in northwestern Spain using the HBV hydrological model. *Hydrological Processes*. 28: 5561-5572.
- Rodríguez-Suárez, J.A., Soto, B., Perez, R. e Diaz-Fierros, F. (2011). Influence of *Eucalyptus globulus* plantation growth on water table levels and low flows in a small catchment. *Journal of Hydrology*. 396: 321-326.
- Samraj, P., Sharda, V.N., Chinnamani, S., Lakshmanan, V. e Haldorai B. (1988). Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by bluegum plantation, Part I - the annual water balance. *Journal of Hydrology*. 103: 335-345.

- Schlesinger, W.H. e Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*. 189–190: 115-117.
- Schyns, J.F., Booij, M.J., Hoekstra, A.J. (2017). The water footprint of wood for lumber, pulp, paper, fuel and firewood. *Advances in Water Resources*. 107: 490-501.
- Sharda, V.N., Samraj, P., Samra, J.S. e Lakshmanan, V. (1998). Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds. *Journal of Hydrology*. 211: 50-60.
- Shaw, E.M., Beven, K.J., Chappell, N.A. e Lamb, R. (2011). *Hydrology in practice* (4.<sup>a</sup> edição). Londres: Spon Press.
- Shiklomanov, I.A. (1993). World fresh water resources, em: Gleick, P.H. (Ed.) *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*. (pp. 13-24). Oxford: Oxford University Press.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. (2010). *Atlas da Água, 2010*. Lisboa: SNIRH.
- Sikka, A.K., Samra, J.S., Sharda, V.N., Samraj, P. e Lakshmanan, V. (2003). Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. *Journal of Hydrology*. 270: 12-26.
- Silveira, L. e Alonso J. (2009). Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes*. 23: 320-329.
- Soares, J.V. e Almeida, A.C. (2001). Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*. 253: 130-147.
- Soares, P. e Tomé, M. (2012). Biomass expansion factors for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. *Forest Systems*. 21 (1): 141-152.
- Soto, B., Brea, M.A., Pérez, R. e Díaz-Fierros, F. (2007). Influence of 7-year old *Eucalyptus globulus* plantation in the low flow of a small basin, em: Lobo Ferreira, J.P. e Vieira, J.M.P. (Eds.) *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*. (pp. 232-241). Guimarães: IAHS.
- Steudle, E. (2001). The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 52: 847-875.
- Sutterlüty, A., Hesser, F., Schwarzbauer, P., Schuster, K. C., Windsperger, A. E Stern, T. (2017). A Delphi approach to understanding varying expert viewpoints in sustainability communication: The case of Water Footprints of bio-based fiber resources. *Journal of Industrial Ecology*. 21: 412-422.
- Taiz, L. e Zeiger, E. (2006). *Plant physiology* (4.<sup>a</sup> edição). Sunderland: Sinauer Associates, Inc, Publishers.
- The Navigator Company. (2015). Relatório de Sustentabilidade 2014/2015. Acedido em 21 de Dezembro de 2016. Disponível

em:[http://www.thenavigatorcompany.com/var/ezdemo\\_site/storage/original/application/6e27db4cab09920dca9b67d91f1ddade.pdf](http://www.thenavigatorcompany.com/var/ezdemo_site/storage/original/application/6e27db4cab09920dca9b67d91f1ddade.pdf)

Thompson, G., Swain, J., Kay, M. e Forster, C.F. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource Technology*. 77 (3): 275-286.

Trenberth, K.E., Smith, L., Qian, T., Dai, A. e Fasullo, J. (2007). Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*. 8: 758-769.

Tyree, M.T. e Zimmermann, M.H. (2002). *Xylem structure and the ascent of sap* (2.<sup>a</sup> edição). Berlim: Springer-Verlag.

UPM-Kymmene. (2011). From forest to paper, the story of our water footprint: A case study for the UPM Nordland Papier mill. Disponível em: <http://waterfootprint.org/media/downloads/UPM-2011.pdf>

Valente, F., David, J.S. e Gash, J.H.C. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*. 190: 141-162.

van der Ent, R.J., Savenije, H.H.G., Schaefli, B., e Steel-Dunne, S.C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources research*. 46: W09525.

van der Ent, R.J., Coenders-Gerrits, M.J., Nikoli, R. e Savenije, H.H.G. (2012). The importance of proper hydrology in the forest cover-water yield debate: commentary on Ellison *et al.* (2012) Global Change Biology 18, 806-820. *Global Change Biology*. 18: 2677-2680.

van der Ent, R.J., Wang-Erlandsson, L., Keys, P.W., e Savenije, H.H.G. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle—Part 2: Moisture recycling. *Earth System Dynamics*. 5: 281-326.

van Oel, P.R., e Hoekstra, A.Y. (2010). *The green and blue water footprint of paper products: Methodological considerations and quantification*. Value of Water Research Report Series, 46. Delft: UNESCO.

van Oel, P. R. e Hoekstra, A. Y. (2012). Towards Quantification of the Water Footprint of Paper: A First Estimate of its Consumptive Component. *Water Resources Management*. 26: 733-749.

Venkatesh, B., Lakshman, N. e Purandara, B.K. (2014). Hydrological impacts of afforestation - A review of research in India. *Journal of Forestry Research*. 25 (1): 37-42.

Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J. e Lammers, R.B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 289: 284-288.

Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C., Davies, P.M., (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467: 555–561.

Ward, R.C. e Robinson, M. (2000). *Principles of Hydrology* (4.<sup>a</sup> edição). Londres: McGraw-Hill.

Wichelns, D. (2010). Virtual Water: A Helpful Perspective, but not a Sufficient Policy Criterion. *Water Resources Management*. 24 (10): 2203–2219.

Wichelns, D. (2015). Virtual water and water footprints: Overreaching into the discourse on sustainability, efficiency, and equity. *Water Alternatives*. 8 (3): 396-414.

Wichelns, D. (2017). Volumetric water footprints, applied in a global context, do not provide insight regarding water scarcity or water quality degradation. *Ecological Indicators*. 74: 420-426.

Water Efficiency Conference. (2013). *Water Efficiency in Buildings Network Proceedings of the Water Efficiency Conference 2013: Innovation through Cooperation*. Oxford: Water Efficiency in Buildings Network and Waterwise.

World Water Assessment Programme. (2016). *The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs*. Paris: UNESCO.

Yang, H., Pfister, S. e Bhaduri, A., (2013). Accounting for a scarce resource: virtual water and water footprint in the global water system. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 5: 599–606.

Zhang, L., Dawes, W.R. e Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*. 37 (3): 701-708.